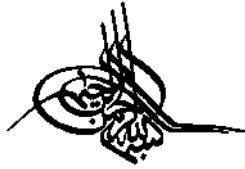


# بوشکاری

فصلنامه انجمن جوشکاری و آزمایش‌های غیرمخرب ایران  
شماره ۱۱۳ - زمستان ۱۴۰۳



مقام دوم بخش گرافیک دهمین مسابقه گرافیک و عکاسی صنعت جوش و بازرسی  
سرکار خانم سمیه دل افکار



انجمن جوشکاری و آزمایش‌های غیرمخرب ایران  
موسسه مرجع ملی در زمینه تکنولوژی جوشکاری و  
آزمایش‌های غیرمخرب در جمهوری اسلامی ایران

مدیر مسئول: مهندس عبدالوهاب ادب آوازه

زیر نظر شورای نویسندگان

مسئول اجرایی: کمیته انتشارات

مدیر اجرایی و گرافیک: دکتر نازیلا ادب آوازه

نشانی دبیرخانه انجمن:

اصفهان - خیابان شمس آبادی - ساختمان شمس -  
طبقه 4- واحد 413

تلفن: 03132240325 فاکس: 03132231765

پست الکترونیک:

[Email: info@iwnt.com](mailto:info@iwnt.com)

فصلنامه جوشکاری نشریه ای در زمینه موضوعات و  
مسائل مرتبط با جوشکاری و آزمایش‌های غیرمخرب  
است.

فصلنامه در ویرایش مقالات رسیده آزاد است

نقل نوشته ها با ذکر ماخذ بلامانع است.

- 1 بررسی ریز ساختار و ابعاد منطقه جوش سوپر آلیاژ Haynes 230 با استفاده از سه روش جوشکاری متفاوت، یاسر وحیدشاد- امیرحسین خدابخشی
- 8 بریدگی کناره (Undercut)، مهندس عبدالوهاب ادب آوازه
- 13 اتصال لب به لب ورق نازک فولاد زنگ نزن فریتی 430 با استفاده از جوشکاری قوسی میکرو پلاسما، محمدرضا دیبانی - فرشید مالک قایینی
- 18 بازسازی تیغه های نوردی از جنس فولاد 2550/1 متوسط فرایند SMAW با استفاده از الکتروود E6UM60، اکبر عباسیان - حسن شریفی - محمد عرفان منش
- 22 بررسی و انجام آزمون‌های غیر مخرب کوره های نم زدایی گاز یک واحد پالایشگاهی به منظور شناسایی و پیشگیری از عوامل تخریب، محمدحسین خواجه محمدی - حسین نجفی محترم - بنیامین پیری - مهدی باقرزاده - محمدجواد حسینی - اکبر سرخوش - صائب مهارتی آذر نوز - حسین رادمهر
- 27 آشنایی با الزامات استاندارد 3834 الزامات کیفیتی در جوشکاری ذوبی مواد فلزی - الزامات کیفیتی جامع - قسمت چهارم، مهندس افشین خیام
- 30 بررسی و ارزیابی مشکلات ناشی از استفاده تسمه فولادی با کیفیت پایین در استحکام و جوشکاری سازه های فولادی، پژمان روناسی - حسن غلام موگویی - علی کرم زاده - علی صالحی
- 35 اتصال غیر مشابه Ti-6Al-4V به فولاد زنگ نزن 316L با یک فرایند اتصال جدید مبتنی بر ساخت افزایشی قوس الکتریکی ترکیب شده با جوشکاری قوس الکتریکی دو سیمی (قسمت اول)، مهندس کاظم بابایی
- 37 ریزساختار و رفتار الکتروشیمیایی اتصال غیر مشابه فولادهای DP980 و MC 500 S در محیط های حاوی یون کلرید، توحید رجبی - مسعود عطاپور
- 43 میکرو ساختار و خواص مکانیکی منطقه جوش در اتصال فولاد هوا ناپذیر Corten A به فولاد ساده کربنی St12 به روش جوشکاری قوس فلز با گاز محافظ دی اکسید کربن، مهرداد وطن دوست - احسان محمدی زهرانی - بهروز بیدختی - علی داودی



مقام دوم بخش گرافیک دهمن مسافه گرافیک و عتاسی صنعت خوش و بازرسی  
سرکار خانم بنیبه دل افشار



## بررسی ریز ساختار و ابعاد منطقه جوش سوپر آلیاژ Haynes 230 با استفاده از سه روش جوشکاری متفاوت

باسرو وحیدشاد<sup>۱</sup>، امیرحسین خدابخشی<sup>۲</sup>

### چکیده

سوپر آلیاژ **Haynes 230** علاوه بر قطعات توربین های گازی، در ساخت محافظه احتراق و نازل تراسترها موتورهای فضایی نیز کاربرد دارند. در این تحقیق ریز ساختار و ابعاد منطقه اتصال این سوپر آلیاژ که توسط سه روش جوشکاری ذوبی قوس پلاسما (PAW)، پرتو لیزر (LW) و پرتو الکترونی (EBW) ایجاد شده است مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مربوط به هر روش شامل شدت جریان، سرعت خطی و یا توان دستگاه به صورت تجربی انتخاب شد تا یک جوش از لحاظ ظاهری سالم ایجاد شود. پس از متالوگرافی و ابعاد گرفته جوش عمق نفوذ و منطقه متأثر از حرارت توسط نرم افزار آنالیز تصویر مورد بررسی قرار گرفت. ریزساختار منطقه جوش نیز توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی بررسی شد. مقادیر سختی منطقه جوش توسط روش میکرو ویکرز اندازه گیری شد. بررسی ها نشان داد که بیشترین نسبت عرض روی جوش به عمق نفوذ مربوط به روش لیزر بوده است و همچنین کم ترین میزان انحلال فاز کاربیدی در منطقه فلز مذاب مربوط به روش لیزر بوده است.

کلمات کلیدی: سوپر آلیاژ، جوشکاری، ریز ساختار، هاینس.

### مقدمه

آلیاژ **HAYNES 230** به منظور برآورده کردن نیاز روز افزون برای استفاده دمای بالا ساخته شد. کاربرد در توربین های گازی پیشرفته موجب شده است این آلیاژ پایداری در دمای بالا، مقاومت به خوردگی و مقاومت به خزش توسعه بیشتری یابند. آلیاژ **HAYNES 230** یک سوپر آلیاژ پایه نیکل است که برای کاربردهای دمای بالا در موتورهای هوایی و صنایع نیروگاهی مورد استفاده قرار می گیرد. این آلیاژ از طریق محلول جامد استحکام می پذیرد و ترکیب شیمیایی آن به نحوی طراحی و تنظیم شده که از تشکیل فازهای بین فلزی نامطلوب **TCP** مانند زیگما، **M** و فازهای لایه که برای خواص مکانیکی و خوردگی مضر هستند جلوگیری شود [۱].

بررسی ترکیب شیمیایی این آلیاژ در دیگرم سه تایی **Ni-Cr-W** نشان می دهد که آلیاژ در محدوده محلول جامد تک فاز قرار دارد. فاز  $\gamma$  یک ساختار آستنیتی یا **FCC** غنی از نیکل است [۲]. سهم

عمده **Cr** در این سیستم افزایش استحکام محلول جامد  $\gamma$  و افزایش مقاومت به خوردگی با تشکیل لایه اکسیدی سطحی است. آلیاژ شدن با عنصر **W** نیز باعث افزایش استحکام محلول جامد  $\gamma$  می شود. عناصر **Cr** و **W** علاوه بر این که باعث افزایش استحکام محلول جامد می شوند با تشکیل فازهای کاربیدی استحکام را افزایش می دهند. تنگستن کاربیدهای **M<sub>6</sub>C** را تشکیل می دهد که ساختار پیچیده کریستالی دارد. کاربیدهای **M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>** غنی از کروم نیز در مرز دانه ها و یا در راستای نابجایی ها تشکیل می شود. فازهای کاربیدی باعث افزایش مقاومت به خزش شده و از تکثیر ترک جلوگیری می کنند و باعث افزایش عمر خستگی می شوند [۳ و ۴]. علاوه بر این حضور عنصر بور (**B**) تا کمتر از ۰٫۱۵ درصد وزنی از تشکیل فاز یونکتیکی در آلیاژ هاینس ۲۳۰ جلوگیری می کند [۵]. جوشکاری ذوبی دو قطعه با استفاده از حرارت دادن منطقه مورد نظر تا دمای بالاتر از نقطه ذوب و سپس سرد شدن تا دمای محیط انجام

می شود. از آنجایی که هاینس ۲۳۰ به طور عمده در صنعت نیروگاهی که اجزای تشکیل دهنده شکل پیچیده ای دارند، استفاده می شود بنابراین فرایند جوشکاری برای رسیدن به به هندسه مورد نظر ضروری است [۶]. در قطعات جوشکاری شده که پس از جوشکاری، تحت عملیات آهنگری قرار می گیرند انعطاف پذیری و شکل پذیری اهمیت زیادی دارد. به عنوان مثال در ساخت نازل هایی از جنس هاینس ۲۳۰ که از جوشکاری و سپس آهنگری چند پدل مختلف تشکیل شده اند، خواص مکانیکی بهینه اتصالات جوش، بخش جدایی ناپذیر بهینه سازی فرایند است. ترک خوردن منطقه جوش از شایع ترین عیوب گزارش شده در آلیاژ هاینس ۲۳۰ است که هم به ترک های انجمادی و هم به ترک خوردگی مذاب در حال انجماد در مجاورت مرز دانه نسبت داده می شود [۹-۷]. جوشکاری ذوبی یک ساختار ماکروسکوپی متمایزی را ایجاد می کند. فلز جوش به شکل دانه های ستونی کشیده شده از بیرون به سمت مرکز حوضچه جوش منجمد می شوند. لیبولود و همکارانش، ساختار دانه های فلز جوش را به دو نوع مرز منحصر به فرد تقسیم می کند که شامل مرزهای فرعی انجمادی (SSGB) و مرز دانه های اصلی انجمادی (SGB) است [۱]. علاوه بر این در ساختار دندریتی منطقه فلز جوش یک گرادیان غلظتی از ترکیب شیمیایی وجود دارد که به دلیل جدایش عناصر آلیاژی در حین انجماد تشکیل می شود. مرزهای اصلی انجمادی نیز به دو نوع مرز اصلی دسته بندی می شود که شامل مرز با زاویه زیاد که اختلاف زاویه زیادی در جهت گیری بلوری نسبت به دانه کناری دارند و مرز اصلی با زاویه کم که اختلاف زاویه کمی در جهت گیری بلوری نسبت به دانه کناری دارند. هندرسون و همکارانش مشخص کرد که ترک خوردن به این دلیل در مهره های جوش تازه تشکیل شده، اتفاق می افتد که منطقه دو فازی مایع-جامد به صورت خمیری بوده و یک تنش کششی را تجربه می کنند. زیرا افزایش مقدار فلز جامد در حالت خمیری، جریان فلز مایع را برای پر کردن نواحی بین دندریتی محدود می کند. علاوه بر این تفاوت در ضریب انبساط حرارتی برای دو فاز مختلف موجب ایجاد تنش بین دو فاز و در نتیجه ایجاد ترک می شود. این نوع ترک در منطقه متاثر از حرارت، جایی که فلز مذاب با فلز پایه جامد در تماس است، بیشتر ملاحظه می شود. این نوع ترک ها در روش های جوشکاری با حرارت ورودی زیاد، مانند GMAW بیشتر مشاهده می شود [۱۰].

در این تحقیق تاثیر روش های فرایند جوشکاری مختلف بر عرض جوش، عمق نفوذ و همچنین ریز ساختار منطقه جوش آلیاژ Haynes 230 مورد بررسی قرار گرفت.

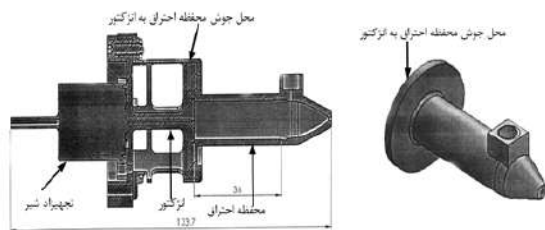
### مواد و روش پژوهش

در این پژوهش از سوپر آلیاژ Haynes 230 به عنوان ماده اولیه استفاده شد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ که با استفاده از آنالیز طیف سنجی جرقه ای (SES) در جدول (۱) آمده است. همانطور که قبلاً اشاره شد قطعه صنعتی که این تحقیق برای بررسی جوشکاری آن ترتیب داده شده است یک تراستر با پیشرانه تک مولفه است که محفظه احتراق آن از جنس سوپر آلیاژ Haynes می باشد.

شکل (۱-الف)، تصویر نمایشی قطعه نهایی و شکل (۱-ب)، نیز محل اتصال مربوط به جوشکاری را نشان می دهد. لازم به ذکر است که این خط جوش به صورت نفوذ ناقص می باشد و هدف از انجام آن اتصال و آب بندی دو قسمت افشانه (انژکتور) و محفظه احتراق است. معمولاً انتخاب نوع فرایند جوشکاری بر اساس عواملی مانند ابعاد قطعه، جنس و شکل اتصال انتخاب می شود. با توجه به کم بودن عرض محل اتصال در این قطعه، روش های جوشکاری با منابع انرژی متمرکز مانند جوشکاری لیزر و جوشکاری پرتو الکترونی، مناسب به نظر می رسد زیرا منابع جوشکاری متمرکز با حرارت ورودی بسیار کمتر، نسبت به روش های معمول باعث انجام فرایند جوشکاری با سرعت بیشتر و نیز کاهش مقدار منطقه متاثر از حرارت می شوند. علاوه بر این فرایند جوشکاری قوس پلاسما نیز به عنوان یک روش معمول مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده در این تحقیق.

عناصر	Ni	Cr	Fe	C	Si	Mn	W	Al	Co	Mo
درصد وزنی (W%)	B	21.6	2.9	0.1	0.3	0.4	13	0.3	0.3	1.09



شکل ۱-الف - تصویر نمایشی قطعه نهایی و محل اتصال محفظه احتراق و افشانه سوخت (انژکتور).

جدول (۲، ۳ و ۴) به ترتیب مربوط به عوامل جوشکاری روش های قوس پلاسما، باریکه الکترونی و باریکه لیزر است. در جوشکاری قوس پلاسما از دو شدت جریان مختلف و دو سرعت خطی مختلف برای جوشکاری استفاده شد.

در روش باریکه الکترونی به دلیل محدودیت هایی که کار با دستگاه جوشکاری پرتو الکترونی وجود دارد، تعداد نمونه های محدودی برای این قسمت در نظر گرفته شد و تنها دو سرعت خطی جوشکاری متفاوت به عنوان متغیرهای فرایند انتخاب شدند. پارامترهای مورد استفاده در جوشکاری پرتو الکترونی بر اساس تجربه و با در نظر گرفتن عرض کم نمونه ها انتخاب شدند.

پس از برش توسط دستگاه وایرکات (EDM)، نمونه ها برای متالوگرافی آماده سازی شدند. برای آشکار کردن ریزساختار در این نمونه ها از محلول کالینگر با ترکیب ۵ گرم کلرید مس، ۱۰۰ میلی لیتر اسید کلریدریک و ۱۰۰ میلی لیتر اتانول استفاده شد. ابعاد جوش شامل عرض روی جوش و عمق نفوذ در هر روش جوشکاری توسط نرم افزار آنالیز تصویر اندازه گیری شد. ریزساختار حاصل از جوش توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی مجهز به آنالیز عنصری EDS مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر سختی نمونه ها نیز از طریق سختی سنجی ویکرز اندازه گیری شد.

جدول ۲- پارامتر های جوشکاری پلازما آلیاژ Haynes 230 .

ردیف	شدت جریان (A)	سرعت خطی (mm/min)	قطر نازل پلازما (mm)	شدت گاز روزه (Lit/Min)
۱	۲۸	۱/۴	۱/۸	۰/۷
۲	۳۵	۱/۴	۱/۸	۰/۷
۳	۳۵	۰/۸۲	۱/۸	۰/۷

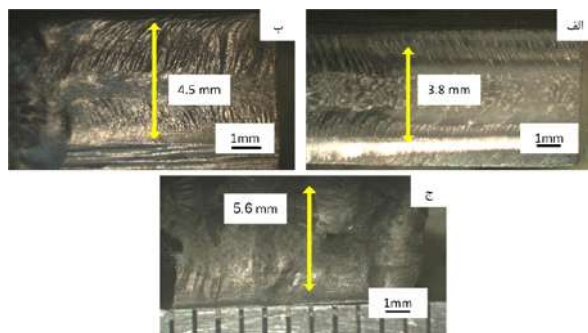
جدول ۳- پارامتر های جوشکاری پرتو الکترونی

ردیف	خلافه محفظه (mbar)	سرعت خطی (mm/min)	شدت جریان (mA)	ولتاژ (KV)
۱	۵×۱۰ <sup>-۵</sup>	۹۰	۲۵	۴۰
۲	۵×۱۰ <sup>-۵</sup>	۷۰	۲۵	۴۰

جدول ۴- پارامتر های مورد استفاده برای جوشکاری لیزر

ردیف	توان (W)	عرض پالس (ms)	فرکانس لیزر (Hz)	سرعت خطی (mm/s)
۱	۲۰۰	۱۰	۸	۳
۲	۱۶۰	۱۰	۸	۳
۳	۱۳۰	۱۰	۸	۳

الکتريکي، عرض روی منطقه اتصال جوش افزایش می یابد. نکته قابل ملاحظه مشاهده اکسیدهای سطحی بر روی محل اتصال است که نشان دهنده کافی نبودن محافظت گاز خنثی تورچ پلازما می باشد. این اکسیدهای سطحی در شکل (2-الف) تا حدودی وجود دارد و همانطور که ملاحظه می شود به دلیل کم بودن مقدار اکسید، سطح روی جوش رنگ روشن تری دارد. شکل (3-ج)، علاوه بر اکسیدهای سطحی با رنگ خاکستری، سطح روی جوش از کیفیت مناسبی برخوردار نیست زیرا افزایش اندازه سطح روی جوش به خاطر افزایش شدت جریان و کاهش سرعت خطی باعث عدم پایداری حوضچه مذاب در سطح مقطع کم محل جوش می شود.



شکل ۳- تصاویر سطح روی جوش نمونه های جوشکاری پلازما با پارامترهای الف- A 28 و 1/4 min/s، ب- A 35 و 1/4 min/s، ج- A 35 و 1/4 min/s.

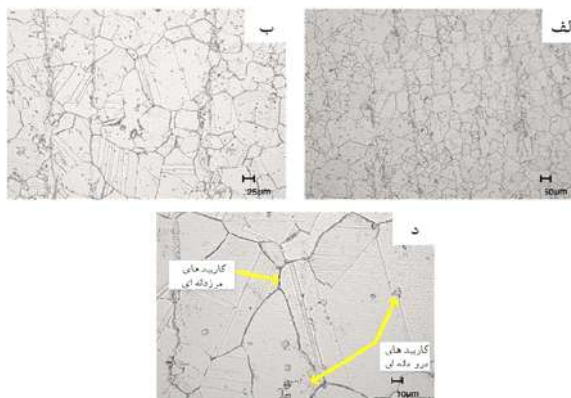
شکل (۴) سطح مقطع نمونه های جوش داده شده با قوس پلازما را نشان می دهد. شکل (۴-الف و ۴-ب) نمونه های جوش داده شده با سرعت خطی 1/4 min/s و با شدت جریان به ترتیب A 28 و A 35 می باشند. همانطور که مشاهده می شود با افزایش شدت جریان از ۲۸ به ۳۵ آمپر، مقدار عمق نفوذ ۰/۸ به ۱/۵ افزایش می یابد. چنین افزایش عمق نفوذ با افزایش شدت جریان کاملاً قابل پیش بینی است. علاوه بر افزایش عمق نفوذ، سطح روی محل اتصال نیز از 8/3 mm به 2/4 mm افزایش یافته است. در شدت جریان ۳۵ آمپر با کاهش سرعت خطی از 1/4 min/s به 0/8 min/s عمق نفوذ از ۱/۵ میلی متر به ۲ میلی متر افزایش می یابد (شکل ۴-ب و ۴-ج).

شکل (۵) نشان دهنده سطح مقطع نمونه جوش داده شده با قوس پلازما را در بزرگنمایی ۵۰۰ برابر نشان می دهد. خط سیاه رنگی که در داخل حوضچه مذاب قرار دارد در حقیقت قسمتی از فصل مشترک بین دو قطعه می باشد که در زمان تشکیل مذاب، به دلیل ماهیت اکسیدی بودن، ذوب نشده اند. سطوح اکسیدی در این نمونه ها به دلیل انتخاب فرایند و ایرکات برای برشکاری تشکیل شده است و در زمان آماده سازی برای جوشکاری می باید از روی سطح برداشته شود. این مشکل در نمونه های بعدی به دلیل آماده سازی نمونه ها توسط دستگاه تراش مشاهده نشد.

شکل (۶) تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار منطقه فلز جوش را نشان می دهد. همانطور که در تصویر مشاهده می شود این منطقه شامل ساختاری دندریتی است که بر اثر سرد شدن با سرعت نسبتاً

## نتایج و بحث

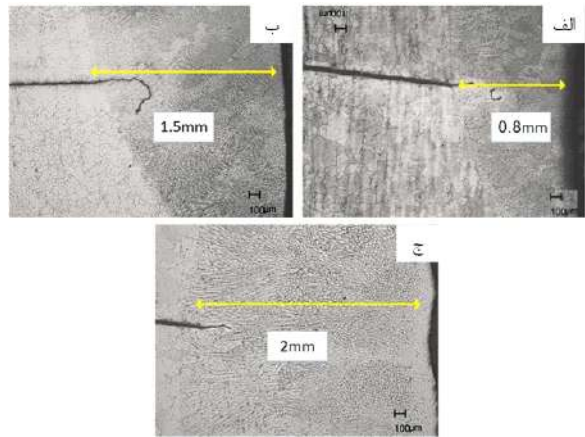
شکل (۲) ریزساختار فلز پایه آلیاژ Haynes 230 مورد استفاده در این بررسی را در بزرگنمایی های مختلف نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود ساختار تقریباً دانه ریز است و تعداد زیادی مناطق دوقلویی در تصاویر دیده می شود. این دوقلوبی ها در ریزساختار فلزات کارپذیر حضور دارند و در فرایند شکل دهی به دلیل حرکت دست جمعی اتم ها به صورت یک صفحه بلوری تشکیل می شود. علاوه بر ساختار دوقلویی، فازهای کاربیدی در ساختار ملاحظه می شود. این فازهای کاربیدی وظیفه افزایش استحکام در دمای پایین و در دمای بالا را دارند و از نوع کاربیدهای پیچیده از نظر ترکیبات شیمیایی هستند. این کاربیدها به صورت فازهای کوچک درون دانه ای، کاربیدهای جزیره ای با ابعاد بزرگتر و کاربیدهای منقطع و نزدیک به هم در مرز دانه ها و مرز دوقلوبی ها در ریزساختار حضور دارند.



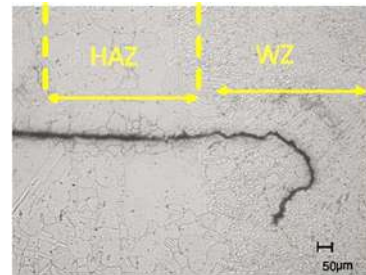
شکل ۲- ریز ساختار فلز پایه آلیاژ Haynes 230

شکل (۳) تصاویر سطح روی جوش پلازما با عوامل جدول (۲) را نشان می دهد همانطور که مشاهده می شود با افزایش شدت جریان

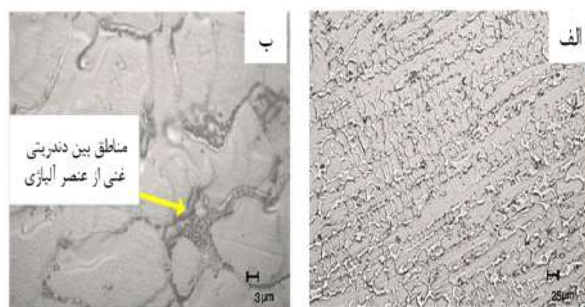
زیاد ایجاد می شود. همانطور که در شکل (۶-ب)، مقادیر زیادی از عنصر آلیاژی در بین بازوهای دندریت ها تجمع پیدا کرده است. البته تجمع عناصر آلیاژی را در ساختار دندریت توسط میکروسکوپ الکترونی می توان به راحتی نشان داد.



شکل ۴- تصاویر سطح مقطع نمونه های جوشکاری پلاسما با پارامتر های الف - 28 A و 1/4 min/s، ب - 35 A و 1/4 min/s، ج - 35 A و 1/4 min/s



شکل ۵- سطح مقطع نمونه 35 A و 1/4 min/s



شکل ۶- ریزساختار منطقه فلز جوش در روش پلاسما.

شکل (۷) ریزساختار قسمت های مخالف جوش ایجاد شده توسط فرآیند پلاسما را نشان می دهد. این مناطق شامل فلز پایه، منطقه متأثر از حرارت، فصل مشترک فلز مذاب با فلز جامد و فلز مذاب می باشد. شکل (۷-الف)، ریزساختار فلز پایه را نشان می دهد. همانطور که در قسمت قبل گفته شد ریزساختار شامل دانه های محلول جامد به همراه فازهای کاربیدی به سه شکل مختلف می باشد. فازهای کاربیدی شامل کاربیدهای جزیره ای ریز در داخل دانه، کاربیدهای

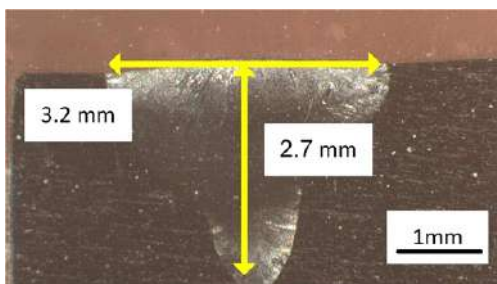
بلوکی شکل بزرگ و کاربیدهای مرز دانه ای است. ترکیب شیمیایی این کاربیدها از نظر حضور عناصری مختلف متفاوت است و با استفاده از آنالیز عنصری میکروسکوپ الکترونی قابل شناسایی هستند. فازهای کاربیدی معمولاً در دماهای بالا تشکیل می شوند و دمای انحلال آنها نیز بالا می باشد با این وجود انحلال کاربیدها به عواملی مختلفی از جمله دما، اندازه، ترکیب شیمیایی و زمانی که در دمای بالا قرار دارند بستگی دارد. شکل (۷-ب)، منطقه متأثر از حرارت را نشان می دهد. با مقایسه این تصویر با شکل (۷-الف)، می توان مشاهده کرد که فاز کاربیدهای ریز جزیره ای داخل دانه تا حد زیاد در زمینه حل شده اند. کاربیدهای مرز دانه ای هم در منطقه متأثر از حرارت دچار انحلال شده اند. انحلال کاربیدهای مرز دانه ای از طریق کاهش ضخامت مرز دانه ها قابل مشاهده است. اما کاربیدهای بلوکی شکل بزرگ، تقریباً بدون تغییر باقی مانده اند. در شکل (۷-ج)، فصل مشترک فلز مذاب و فلز جامد مشاهده می شود. همانطور که ملاحظه می شود بخش زیادی از فازهای کاربیدی جزیره ای ریز، در این قسمت حل شده اند زیرا دمای این محدوده بسیار بالا می باشد. قسمتی از مرز دانه فلز جامد را نیز مشاهده می شود که با ورود به قسمت فلز مذاب از بین رفته است. شکل (۷-ج)، نیز مرکز منطقه فلز مذاب را نشان می دهد. لازم به ذکر است قسمت زیادی از فازهای تیره رنگ مشاهده شده در تصویر فازهای کاربیدی هستند که در حین انجماد در بین بازوهای دندریتی تشکیل می شوند. مذاب منجمد شده در بین بازوهای دندریت ها محل تجمع عناصر آلیاژی در حین انجماد فلز جوش هستند و از نظر غلظت عناصر آلیاژی در بیشترین حالت ممکن نسبت به فضای داخل دندریت هستند. نکته قابل توجه در این قسمت حضور کاربیدهای بلوکی شکل بزرگ هستند. این کاربیدها در دماهای بالا در زمینه حل می شوند از طرفی انحلال کامل آنها نیاز به زمان دارد که با توجه به سرعت انجماد حوضچه مذاب این زمان تا حدی کم است. با این وجود تشخیص این که کاربیدهای بلوکی کاملاً حل شده اند و یا در حین انجماد تشکیل شده اند نیاز به بررسی های میکروسکوپ الکترونی و استفاده از سیستم آنالیز عنصری دارد.

شکل (۸) ریزساختار سطح مقطع نمونه های جوشکاری شده با روش لیزر و با عوامل مختلف را نشان می دهد. در این تصویر عمق نفوذ و سطح روی جوش را می توان اندازه گیری کرد. در مقایسه با روش قوس تنگستن با گاز محافظ، بیشترین عمق نفوذ ایجاد شده در روش لیزر در این تحقیق یک میلی متر از بیشترین عمق نفوذ روش پلاسما، کمتر است. ولی سطح روی جوش نزدیک به پنج برابر از جوش سطح روی جوش پلاسما کمتر است. این تفاوت ابعادی در جدول (۵) برای بیشترین مقدار نفوذ هر روش آورده شده است.

شکل (۹) تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع نمونه جوش لیزر را نشان می دهد. تصویر منطقه متأثر از حرارت در شکل (۹-الف)، مشاهده می شود. مقایسه این محدوده با منطقه متأثر از حرارت در روش قوس پلاسما نشان می دهد که حرارت ورودی کمتر این روش در مقایسه با روش پلاسما، باعث کاهش شدید اندازه منطقه متأثر از حرارت می شود. فلز جوش مانند نمونه قبلی (جوش پلاسما تصویر شکل ۷) دارای ساختار دندریتی می باشد.

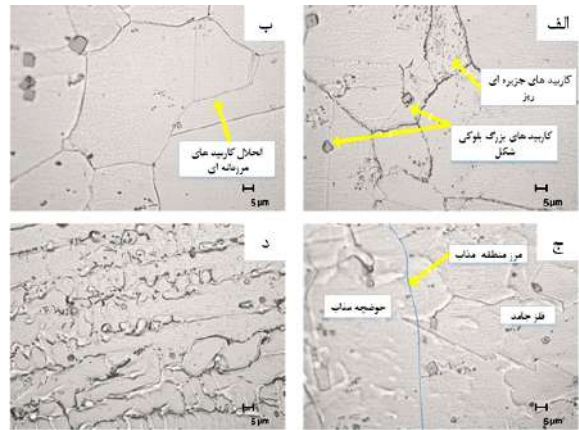
شکل (۹) تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع نمونه جوش لیزر را نشان می دهد. تصویر منطقه متأثر از حرارت در شکل (۹-الف)، مشاهده می شود. مقایسه این محدوده با منطقه متأثر از حرارت در روش قوس پلاسما نشان می دهد که حرارت ورودی کمتر این روش در مقایسه با روش پلاسما، باعث کاهش شدید اندازه منطقه متأثر از حرارت می شود. فلز جوش مانند نمونه قبلی (جوش پلاسما تصویر شکل ۷) دارای ساختار دندریتی می باشد. این ساختار در شکل (۹) دیده می شود. مقایسه ابعاد دندریت های حاصل از انجماد مذاب در منطقه فلز مذاب جوش لیزر با منطقه مذاب جوش پلاسما نشان داد که ابعاد دندریت های منطقه فلز جوش لیزر، بسیار ریزتر از جوش پلاسما است. این کاهش اندازه دندریت، ها به دلیل متمرکز بودن منبع حرارت و کاهش ابعاد روی جوش و در نتیجه افزایش سرعت سرد شدن بر اثر انتقال حرارت می باشد. در مورد انحلال فازهای کاربیدی در قسمت های مختلف می توان گفت که در محدوده منطقه متأثر از حرارت انحلال فاز کاربیدی جزیره ای ریز را می توان مشاهده کرد. با این وجود کاربیدهای بلوکی با ابعاد بزرگ بدون تغییر در منطقه متأثر از حرارت دیده می شوند (شکل ۹ ب).

تصویر ماکروسکوپی سطح مقطع نمونه جوش پرتو الکترونی در تصویر شکل (۱۰) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود، اندازه عمق نفوذ در این روش نسبت به نتایج بدست آمده برای عوامل انتخاب شده به روش لیزر بیشتر است. نه تنها عمق نفوذ، بلکه سطح روی جوش پرتو الکترونی نسبت به جوش لیزر به اندازه قابل توجهی بیشتر است. بیشترین عمق نفوذ به دست آمده برای جوش پرتو الکترونی در این تحقیق در مقایسه با بیشترین عمق نفوذ روش پلاسما (شکل ۱۰). نشان داد که با وجود این که عمق نفوذ روش پلاسما نزدیک به پرتو الکترونی است اما سطح روی جوش پلاسما بسیار بزرگ تر بوده و کیفیت سطحی جوش پرتو الکترونی را نیز نخواهد داشت. لازم به ذکر است جوشکاری پرتو الکترونی قابلیت ایجاد عمق نفوذهای بسیار بالاتر از مقادیر به دست آمده در این تحقیق را نیز دارد و محدودیت های انتخاب عوامل جوشکاری پرتو الکترونی در این تحقیق، امکان دستیابی به عمق نفوذهای بیشتر را فراهم نمی کرد.

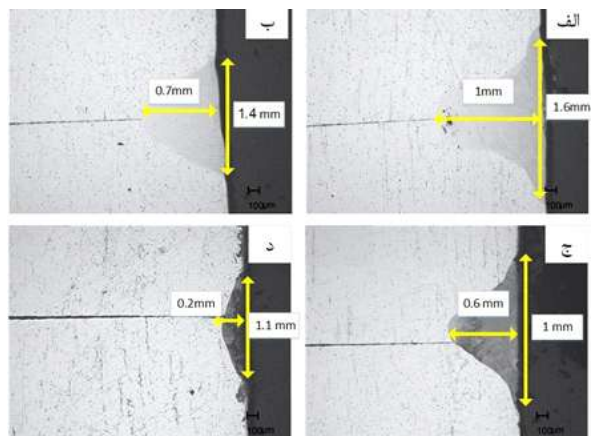


شکل ۱۰- تصویر سطح مقطع دو نمونه جوش کاری شده توسط پرتو الکترونی.

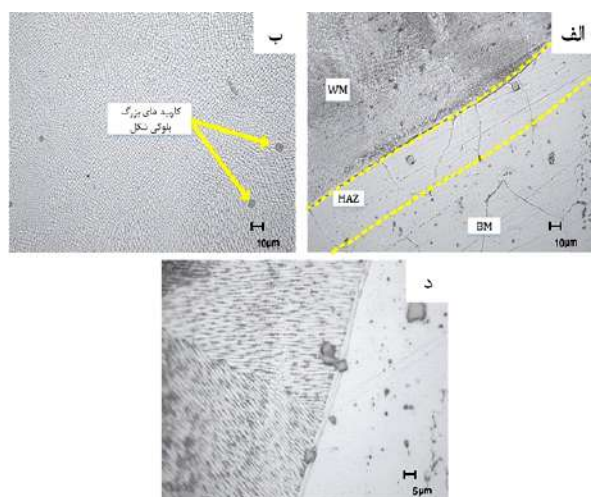
شکل (۱۱) ریزساختار منطقه جوش نمونه جوش داده شده با پرتو الکترونی را نشان می دهد. این نمونه نیز شامل ریزساختار دندریتی می باشد. همانطور که در شکل (۱۱-ب)، مشاهده می شود. اندازه بازوهای دندریتی نسبت به جوش پلاسما کوچکتر هستند ولی نسبت



شکل ۷- ریز ساختار میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی بالا از مناطق الف- فلز پایه، ب- منطقه متأثر از حرارت، ج- فصل مشترک فلز مذاب و منطقه متأثر از حرارت، د- فلز مذاب.



شکل ۸- سطح مقطع نمونه های جوشکاری شده به روش لیزر



شکل ۹- تصاویر میکروسکوپ نوری از مقطع جوش لیزر الف- منطقه فلز مذاب، متأثر از حرارت و فلز پایه، ب- بزرگ نمایی بیشتر از منطقه فلز مذاب، ج- بزرگنمایی بالاتر از منطقه فصل مشترک مذاب و فلز پایه.

سختی نمونه جوشکاری پلاسما در منطقه متأثر از حرارت کاهش چشمگیری دارد که نشان دهنده تغییرات ریزساختاری بیشتر به ویژه انحلال فازهای کاربیدی می باشد.

### نتیجه گیری و جمع بندی

-در بین نمونه های جوشکاری شده با روش های مختلف، نمونه مربوط به جوشکاری پرتو الکترونیک دارای بیشترین عمق نفوذ می باشد. با این وجود بیشتری نسبت عمق به سطح جوش در نمونه های جوشکاری لیزر مشاهده شد.

-به دلیل سرعت بالای انجماد مناطق دندریتی در نمونه های جوش لیزر بسیار ظریف تر از نمونه های دیگر می باشد.

-به دلیل سرعت زیاد جوشکاری فازهای کاربیدی حل نشده در منطقه فلز جوش نمونه های جوشکاری لیزر و پرتو الکترونی دیده می شود.

-وجود فازهای کاربیدی باقی مانده و همچنین فازهای دندریتی ظریف ناشی از انجماد سریع در روش های پرتو الکترونی و لیزر موجب افزایش نسبی سختی منطقه فلز جوش شده است.

-سختی منطقه جوش نمونه های جوشکاری لیزر به دلیل ریز دانه بودن بیشتر از سختی منطقه جوش نمونه های جوش پرتو الکترونی و جوش پلاسما می باشد.

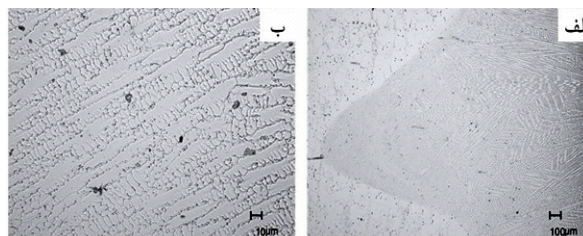
-منطقه متأثر از حرارت در جوش لیزر بسیار بارک و تا حدودی غیر قابل تشخیص می باشد.

-وجود منطقه متأثر از حرارت بسیار کوچک در نمونه های جوشکاری لیزر باعث شده تا ریز ساختار این نمونه ها در منطقه متأثر از حرارت کمترین تغییر ریزساختاری را داشته باشو و بنا براین کاهش سختی کم در این نمونه ها مشاهده شد.

### منابع

- 1-Lippold, John C., Samuel D. Kiser, and John N. DuPont. *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys*. John Wiley & Sons, 2011.
- 2-Tanaka, R., M. Kikuchi, T. Matsuo, S. Takeda, H. Nishikawa, T. Ichihara, and M. Kajihara. "STRENGTHENING FACTORS AND PHASE RELATION IN Ni-Cr-W ALLOYS DEVELOPED FOR NUCLEAR STEELMARING." In *Proceedings of 4th International Symposium on Superalloys*, p. 481. 1980.
- 3-Rooy, E. L., and J. H. L. Linden. "ASM Metals Handbook, Vol 02 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials." *Metals Park, Ohio* (1990).
- 4-Davis, Joseph R., ed. *Nickel, cobalt, and their alloys*. ASM international, 2000.
- 5-Tanaka, R., M. Kikuchi, T. Matsuo, S. Takeda, H. Nishikawa, T. Ichihara, and M. Kajihara. "STRENGTHENING FACTORS AND PHASE RELATION IN Ni-Cr-W ALLOYS DEVELOPED FOR NUCLEAR STEELMARING." In *Proceedings of 4th International Symposium on Superalloys*, p. 481. 1980.
- 6- Creese, Robert. *Introduction to manufacturing processes and materials*. CRC Press, 2017.

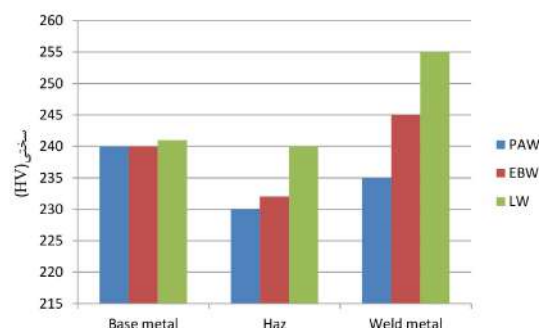
به جوش لیزر ابعاد دندریتی ها بزرگتر می باشند. کوچک بودن ابعاد بازوهای دندریتی نشان دهنده زیاد بودن سرعت سرد شدن در جوش لیزر نسبت به جوش پرتو الکترونی است.



شکل ۱۱- ریزساختار منطقه جوش نمونه جوشکاری شده با پرتو الکترونی

جدول ۵- مقایسه ابعاد عمق جوش و عرض روی جوش در نمونه های مختلف

نمونه	بیشترین عمق نفوذ به دست آمده (mm)	سطح روی جوش (mm)
تیک پالسی	۱/۲	۴/۹
پلاسما	۲	۵/۴
لیزر	۱	۱/۶
الکترون بیم	۲,۷	۳,۲



شکل ۱۲- میکرو سختی ویکرز از سه منطقه مختلف جوش

شکل (۱۲) مقدار سختی فلز پایه، منطقه متأثر از حرارت و فلز جوش را در نمونه های مختلف نشان می دهد. بیشترین مقدار سختی فلز جوش در نمونه جوشکاری لیزر دیده شد که می توان آن را به خاطر وجود ساختار دندریتی ریزتر نسبت داد. علاوه براین به دلیل نرخ بالاتر انجماد زمان زیادی برای انحلال فازهای کاربیدی وجود ندارد. بنابراین تا حد زیادی فازهای کاربیدی در منطقه فلز جوش نمونه لیزر مشاهده می شود. در نمونه جوشکاری قوس پلاسما به دلیل زمان زیاد انجماد و نیز حرارت ورودی غیرمتمرکز علاوه بر وجود بازوهای دندریتی بزرگتر، دانه هایی با اندازه بسیار بزرگتر نسبت به دو روش جوشکاری پرتو لیزر و پرتو الکترونی در فلز جوش دیده می شود که دلیل اصلی کاهش سختی منطقه فلز جوش در نمونه جوشکاری قوس پلاسما می باشد. مقایسه مقادیر سختی منطقه متأثر از حرارت نیز نشان می دهد که در جوش لیزر به دلیل حرارت ورودی بسیار پایین، تغییرات ریزساختاری بسیار کمی در این ناحیه اتفاق می افتد. به همین دلیل سختی منطقه متأثر از حرارت در نمونه جوش لیزر تفاوت زیادی با سختی فلز پایه ندارد. در مقابل،



Superalloy." *Journal of Materials Science & Technology* 5 (2006).  
10- Williston, David Hugh. *Comparison of joining processes for Haynes 230 nickel based super alloy*. Mississippi State University, 2013.



#### پی نوشت

- 1-استادیار پژوهشگاه فضایی ایران، پژوهشکده سامانه های حمل و نقل فضایی
- 2-محقق پژوهشگاه فضایی ایران، پژوهشکده سامانه های حمل و نقل فضایی؛

7-Henderson, M. B., D. Arrell, R. Larsson, M. Heobel, and G. Marchant. "Nickel based superalloy welding practices for industrial gas turbine applications." *Science and technology of welding and joining* 9, no. 1 (2004): 13-21.  
8-Hemsworth, B., T. Boniszewski, and N. F. Eaton. "Classification and definition of high-temperature welding cracks in alloys." *Metal Construction* 1, no. 2 (1969): 5-16.  
9-Lee, I. K. "Susceptibility to hot cracking and weldment heat treatment of Haynes 230



## بریدگی کناره (Undercut)

مهندس عبدالوهاب ادب آوازه<sup>۱</sup>

### انواع بریدگی کناره

معمولاً بریدگی کناره به دو نوع بریدگی کناره بیرونی و بریدگی کناره داخلی طبقه بندی می شود.

### بریدگی کناره بیرونی

بریدگی کناره بیرونی معمولاً از طرف روی جوش در کنار جوش قابل رویت است. عوامل موثر در تشکیل بریدگی کناره بیرونی عبارتند از:

- سیالیت حوضچه جوش
- سرعت جوشکاری
- زاویه جوشکاری
- شدت جریان جوشکاری

اگر حوضچه جوش حین جوشکاری نتواند شیار بوجود آمده را بخوبی پر کند یا اگر فلز ذوب شده حین سرد شدن به درستی انجماد پیدا نکند، شیار یا فرورفتگی در کنار لبه جوش پدیدار می شود که به آن بریدگی کناره گفته می شود. بریدگی کناره بیرونی به آسانی با بازرسی چشمی، شناسایی و اندازه گیری می شود.



شکل ۲- بریدگی کناره بیرونی

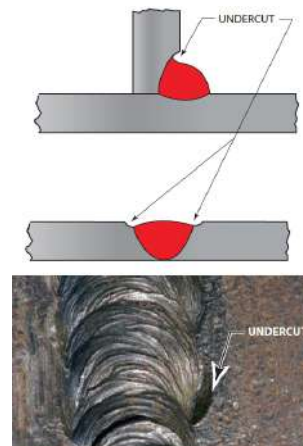
### بریدگی کناره داخلی

بریدگی به وجود آمده در طرف ته پخ شیار در محل برخورد فلز جوش

### مقدمه

بریدگی کناره یکی از معمول ترین و نامطلوب ترین عیوبی است که می تواند در جوشکاری وجود داشته باشد. بریدگی کناره شیار یا فرورفتگی است که در طول لبه مهره جوش جایی که فلز پایه ذوب می شود اما با جوش پر نمی شود، تشکیل می شود. بریدگی کناره به عنوان یک شیار یا فرورفتگی ممکن است در هر دو طرف شیار جوش ظاهر شود.

عمق و پهناي بریدگی کناره ممکن است متفاوت باشد. بریدگی کناره، سطح مقطع عرضی و استحکام اتصال جوش را کاهش می دهد و در محل بریدگی تمرکز تنش ایجاد می کند و شانس خوردگی و ترک ناشی از خستگی را افزایش می دهد و به ویژه در جوشکاری فولاد کم آلیاژ استحکام بالا می تواند منجر به آسیب دیدگی سازه شود.



شکل ۱- بریدگی کناره

و فلز پایه که معمولاً در داخل اتصال جوش مخفی شده و از بیرون دیده نمی‌شود، بریدگی کناره داخلی نام دارد. بریدگی کناره داخلی نوعاً بخاطر جاری شدن و انجماد غیریکنواخت حوضچه جوش حین فرایند جوشکاری پیش می‌آید.

هنگام جوشکاری ————— طعات ضخیم یا اعمال فرایند جوشکاری چندپاسی، بریدگی کناره داخلی ممکن است بخاطر جاری شدن ممانعت شده حوضچه جوش در ته پخ یا کنترل نادرست پارامترهای جوشکاری ایجاد شود.

چون بریدگی کناره داخلی در درز جوش پنهان است، بازرسی چشمی آن دشوار است و برای شناسایی و ارزیابی آن معمولاً از رادیوگرافی یا آزمایش فراصوتی استفاده می‌شود.

حضور بریدگی کناره داخلی اثر منفی بر عملکرد درز جوش با کاهش ظرفیت تحمل بار و مقاومت به خوردگی اتصال جوش دارد.



شکل ۳- بریدگی کناره داخلی

### عوامل موثر در ایجاد بریدگی کناره جوش

عوامل زیادی در ایجاد بریدگی کناره جوش دخالت دارند:

- **زیاد بودن آمپر و ولتاژ:** موجب می‌شود که فلز پایه گرمای زیادی ببیند و زودتر از فلز پرکننده ای که قرار است شیار بوجود آمده را بپرکند، ذوب شود.

- **نادرستی فلز پرکننده یا اندازه آن:** که می‌تواند بر هدایت و توزیع قوس تأثیر بگذارد و ایجاد گرمای ورودی غیریکنواخت شود.

- **نادرستی فلز پرکننده یا گاز محافظ:** که می‌تواند بر انبساط و انقباض حرارتی بین فلز جوش و فلز پایه تأثیرگذار باشد و به ایجاد گپ و ترک منجر شود.

- **ضعیف بودن تکنیک یا سرعت:** که می‌تواند موجب ناکافی بودن نفوذ، رسوب جوش یا ذوب فلز پرکننده شود.

- **مرطوب یا آلوده بودن الکتروود:** که می‌تواند پایداری و کیفیت قوس را کاهش دهد و وارد کردن ناخالصی‌ها به داخل حوضچه جوش شود. بریدگی کناره ممکن است در فرایندهای مختلف جوشکاری قوسی ایجاد شود.

جدول ۱- احتمال وجود بریدگی کناره در فرایندهای جوشکاری

Discontinuities Commonly Encountered with Welding Processes							
Welding Process	Cracks	Incomplete Fusion	Incomplete Joint Penetration	Overlap	Porosity	Slag	Undercut
<b>Arc:</b>							
EGW—Electro gas welding	•	•	•	•	•	•	•
GTAW—Gas tungsten arc welding	•	•	•	•	•	•	•
PAW—Plasma arc welding	•	•	•	•	•	•	•
SAW—Submerged arc welding	•	•	•	•	•	•	•
SW—Shielded metal arc welding	•	•	•	•	•	•	•
CAW—Carbon arc welding	•	•	•	•	•	•	•
FCAW—Flux cored arc welding	•	•	•	•	•	•	•
GMAW—Gas metal arc welding	•	•	•	•	•	•	•
SMAW—Shielded metal arc welding	•	•	•	•	•	•	•

در حالت های تخت، افقی، عمودی و سقفی نیز احتمال تشکیل بریدگی کناره متفاوت است. حالت های عمودی و سقفی با توجه به نیروی گرانش برای ایجاد بریدگی کناره مستعدتر هستند.

### تأثیر بریدگی کناره بر عملکرد قطعه جوش داده شده

#### - تحت بارهای استاتیکی

- **در وضعیت مومسانی قطعه:** بریدگی کناره، مساحت مقطع عرضی اتصال را کاهش می‌دهد و تنش های موضعی را افزایش می‌دهد. اگر بریدگی کناره در راستای موازی با راستای تنش اعمالی و در وضعیت مومسانی باشد، تأثیر چندانی بر عملکرد اتصال ندارد.

- **در وضعیت شکننده قطعه:** هر بریدگی کناره، ریسک شکست ترد را برای متریال استحکام بالا یا قطعات ضخیم جوش داده شده، افزایش می‌دهد.

#### تحت بارهای دینامیک

- پنجه جوش تیز موجب انتشار ترک های ریز می‌شود. اما اگر لبه شیار گرد باشد، ترک ریز نشان نمی‌دهد.

- رابطه بین عمق بریدگی کناره و مقاومت خستگی: هر چه عمق بریدگی کناره بیشتر باشد، مقاومت خستگی بیشتر کم می‌شود.

#### خوردگی

- در محیط های خورنده، بریدگی کناره یا شیار پنجه جوش بخاطر تجمع محصولات خوردگی در آن محل به خوردگی شتاب بیشتری می‌دهد.

بریدگی های کناره، در محیط های خیس یا حاوی پسماندهای متالورژیکی، مخاطرات بیشتری مطرح می‌کنند.

- این عوامل، به حداقل رسانیدن بریدگی کناره برای حفظ یکپارچگی سازه و عملکرد قطعات جوش داده شده را به ویژه تحت شرایط متغیر بارگذاری دوره ای و محیط های خورنده را بسیار مهم جلوه می‌دهد.

### راه های جلوگیری از بریدگی کناره

باتوجه به نوع متریال، طرح اتصال و حالت جوشکاری، برای جلوگیری از بریدگی کناره لازم است پارامترها و تکنیک جوشکاری به درستی تنظیم شوند.

- **استفاده از آمپر یا ولتاژ مناسب** که حرارت لازم برای ذوب فلز پایه و فلز پرکننده را تامین کند و زیاد نباشد که موجب ذوب یا پاشش اضافی شود.

- **انتخاب زاویه یا اندازه درست الکتروود** که بتواند قوس مناسب را ایجاد کند و حرارت را در طول مهره جوش توزیع نماید. عموماً برای حالت های تخت و افقی، زاویه ۹۰ درجه، برای حالت عمودی زاویه ۴۵ درجه و برای حالت سقفی زاویه ۵ تا ۱۵ درجه بین الکتروود و قطعه در نظر گرفته می‌شود (جدول ۲).

- **انتخاب فلز پرکننده یا گاز مناسب** که خواص و ترکیب همخوان با فلز پایه از نظر استحکام کششی، قابلیت نرمی و انبساط حرارتی داشته باشند تا ریسک ترک خوردن یا پیچیدگی بخاطر تنش

حرارتی را به حداقل برساند.

گاز محافظ نیز باید بتواند حوضچه جوش را از آلودگی و اکسیداسیون جوی محافظت نماید. معمولاً برای جوشکاری و فلزات غیر آهنی از گاز محافظ آرگون یا هلیوم استفاده می شود. برای جوشکاری فولاد کربنی از گاز محافظ دی اکسید کربن و برای جوشکاری فولاد زنگ نزن از گاز محافظ آرگون استفاده می شود (جدول ۳).

جدول ۲- عوامل موثر بر انتخاب الکتروود

Variable Factors (a)	Electrode Class										
	E6010	E6011	E6012	E6012X	E6013	E7014	E7016	E7018	E6020	E7024	E6027
11. Appearance, undercutting	6	6	8	7	9	9	7	10	9	10	10

جدول ۳- عملکرد نسبی گاز محافظ برای بریدگی کناره Argon & Helium

Characteristics and Comparative Performance of Argon and Helium as Shielding Gases	
<b>Argon</b>	
Automatic welding:	May cause porosity and undercutting with welding speeds of more than 25 in./min. Problem varies with different metals and thicknesses, and can be corrected by changing to helium or a mixture of argon and helium.
<b>Helium</b>	
Automatic welding:	With welding speeds of more than 25 in./min, welds with less porosity and undercutting may be attained (depending on work metal and thickness).

### بهبود تکنیک یا سرعت جوشکاری

مهارت جوشکاری باید قابل قبول بوده و از تکنیک جوشکاری سازگار استفاده شود تا مهره های جوش صاف و هموار تولید شود. تکنیک ریشه ای نسبت به تکنیک بافته ای برتری دارد اما در صورت استفاده از تکنیک بافته ای، اگر دامنه نوسان به طرفین جوش زیاد باشد، گرمای ورودی غیریکنواخت می شود و شانس ایجاد بریدگی کناره افزایش می یابد. سرعت جوشکاری حتی المقدور باید یکنواخت باشد و با نرخ رسوب فلز پرکننده و ذوب فلز پایه همخوانی داشته باشد.

سرعت خیلی آهسته می تواند ورودی حرارت را بالا ببرد و ذوب اضافی ایجاد نماید، در حالی که سرعت خیلی زیاد، میزان نفوذ و ذوب را ناکافی می کند.

### خشک و تمیز نگهداشتن الکتروود

انبارش الکتروود در مکان مناسب و خشک کردن الکتروودهای روکش قلبیایی در آون، قبل از استفاده لازم است. رطوبت جذب شده بوسیله روکش الکتروود سبب تخلخل و شکنندگی هیدروژنی و ناپایداری قوس در جوش می شود. همچنین الکتروود باید تمیز بوده و به دور از آلاینده های رنگ، زنگ، روغن و گریس و غیره باشد.

### معیار پذیرش بریدگی کناره

#### الف - در جوش اسکلت فلزی

##### ◆ طبق AWS D1.1

عمق بریدگی کناره برای مترپال با ضخامت تا ۲۵ میلی متر، نباید از یک میلی متر بیشتر باشد به استثنای موارد زیر:  
- طول مجموع بریدگی کناره با عمق یک و نیم میلی متر نباید از 50 میلی متر در طول ۳۰۰ میلی متر جوش بیشتر باشد.

برای مترپال با ضخامت بیشتر از ۲۵ میلی متر با هر طول جوش، عمق بریدگی کناره نباید از یک و نیم میلی متر بیشتر باشد.

- در اعضای اصلی وقتی راستای جوش عمود بر راستای تنش کششی است، تحت هر شرایط بارگذاری طرح، عمق بریدگی کناره نباید از ۰/۲۵ میلی متر بیشتر باشد. در کلیه موارد دیگر، عمق بریدگی کناره نباید از یک میلی متر بیشتر باشد.

### ◆ طبق AS 1554.1

استاندارد جوشکاری اسکلت فولادی استرالیای، اندازه مجاز بریدگی کناره را تحت عنوان **SP** برای اسکلت فولادی و تحت عنوان **GP** برای کاربرد عمومی (غیر اسکلت فولادی) برای دو نوع بریدگی کناره (بریدگی کناره پیوسته و بریدگی کناره منقطع) در جدول ارائه کرده است.

جدول ۴- بریدگی کناره مجاز در جوش های لب بلب و گوشه ای در بازرسی چشمی، بازرسی مایع نافذ و بازرسی ذره مغناطیسی

نوع	پارامتر	نماد	پیشینه مجاز ایجاد یا تعداد نقص ها	
			کاربرد عمومی GP	اسکلت فلزی GP
بریدگی کناره پیوسته	عمق	h	1/10، پیشینه ۱/۵ میلی متر	2/20، پیشینه ۱ میلی متر
بریدگی کناره منقطع	عمق	h	1/5، پیشینه ۲ میلی متر	1/10، پیشینه ۱/۵ میلی متر

طبق **ISO 6520-1** برای سازه های فلزی عمق مجاز بریدگی کناره را برای سه سطح کیفیت ارائه کرده است (جدول ۵).

جدول ۵- عمق مجاز بریدگی کناره برای سه سطح کیفیت

شماره	شماره مرجع در ISO 6520-1	شماره نقش	ملاحظات	ملاحظات (0 mm)		
				B	C	D
۷-۱	۵-۱۱ ۵-۱۲	بریدگی عمق کناره جوش بریدگی منقطع کناره جوش	انتقال سطح هموار نیاز است. این مورد به عنوان نقش سیستمی تلقی نمی گردد.	۳ تا ۱۵	۳ تا ۱۵	۳ تا ۱۵
				نواصی کوچک h ≤ 0.11	نواصی کوچک h ≤ 0.11	نواصی کوچک h ≤ 0.11
				نواصی بزرگ h ≤ 0.11	نواصی بزرگ h ≤ 0.11	نواصی بزرگ h ≤ 0.11
				نواصی بزرگ h ≤ 0.11	نواصی بزرگ h ≤ 0.11	نواصی بزرگ h ≤ 0.11
				نواصی بزرگ h ≤ 0.11	نواصی بزرگ h ≤ 0.11	نواصی بزرگ h ≤ 0.11

### ب - در خط لوله

#### ◆ طبق API 1104

##### - بازرسی چشمی

عرض بریدگی کناره نباید از ۰/۸ میلی متر و عمق آن نباید از ۰/۸ میلی متر بیشتر باشد. طول کل بریدگی کناره نباید از 50/8 میلی متر در هر ۱۵۲ میلی متر طول جوش یا ۵ درصد ضخامت دیواره لوله (برای جوش کوتاه تر) بیشتر باشد.

##### - رادیوگرافی

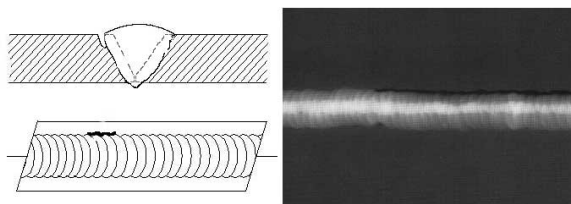
بریدگی کناره، ذوب شیار فلز پایه مجاور به پنجه یا ریشه جوش است که با فلز جوش پرنشده است. بریدگی کناره مجاز گذر آخر و یا بریدگی کناره مجاور ریشه جوش اگر هر یک از شرایط زیر را داشته باشند، عیب محسوب می شوند:

- مجموع طول بریدگی کناره نباید بیشتر از ۵۰ میلی متر در هر 300 میلی متر طول جوش بیشتر باشد.  
- مجموع طول بریدگی کناره نباید از یک ششم طول جوش بیشتر

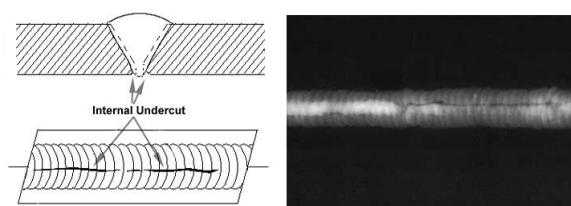
باشد.

الحاقی نازل ها، منهول ها، دریچه های نوع همسطح و جوش های داخلی بدنه به کف، حداکثر مجاز عمق بریدگی کناره ۰/۴ میلی متر است.

- برای اتصالات لب بلب افقی، اتصالات دائمی افقی و اتصالات لب به لب حلقه دور کف، حداکثر مجاز عمق بریدگی کناره ۰/۸ میلی متر است.



شکل ۴ - تصویر رادیوگرافی بریدگی کناره بیرونی



شکل ۵ - تصویر رادیوگرافی بریدگی کناره داخلی

### و- در مخزن تحت فشار

#### طبق ASME Section VIII-Div.1

در UW-35 ارایه شده است که کاهش در ضخامت ناشی از فرایند جوشکاری شامل بریدگی کناره به شرطی که همه موارد زیر را برآورده کند، قبول است:

- کاهش در ضخامت متر یا کمتر متصل شونده در هر نقطه طوری نباشد که ضخامت را کمتر از ضخامت طراحی برساند.

- کاهش در ضخامت نباید از یک میلی متر یا ده درصد ضخامت اسمی قطعات متصل شونده، هر کدام کمتر است، بیشتر باشد.

### تعمیر بریدگی کناره

برای بازگرداندن یکپارچگی و بهبود عملکرد قطعه جوش داده شده دارای بریدگی کناره، تعمیر بریدگی کناره ضروری است.

### سنگ زنی یا گوج زنی

با سنگ زنی یا گوج زنی، یک شیار صاف قدری پهن تر از بریدگی کناره اصلی ایجاد می شود.

### تمیز کردن و آماده سازی شیار

شیار ایجاد شده، با استفاده از برس یا حلال و غیره از هرگونه آلاینده مانند اکسید، جرقه، یا ناخالصی پاک می شود. در صورت لزوم برای جلوگیری یا کاهش تنش حرارتی و ترک خوردگی، پیش گرمایش مناسب توصیه می شود.

### پر کردن شیار با جوش

بسته به مورد، از فلز پرکننده و تکنیک جوشکاری مناسب در یک یا چند پاس، شیار آماده سازی شده با جوش پر شود. با اطمینان از هم پوشانی هر پاس با پاس قبلی، جوش از یک انتهای شیار شروع و به انتهای دیگر شیار ختم شود.

در این جوشکاری گرمای ورودی و سرعت جوشکاری به دقت کنترل شود تا بریدگی کناره جدیدی پیش نیاید.

### پرداخت و بازرسی جوش

با استفاده از صفحه سنگ یا سوهان، لبه زیر یا نامنظمی ها صاف شود. با برس یا چکش سرباره پاک کنی سطح جوش و اطراف آن تمیز شود. سپس جوش تعمیری به روش بازرسی چشمی، مکانیکی یا غیر مخرب بازرسی شود.

### ج- در پل

#### طبق AWS D1.5

معیار پذیرش جوش پل ها، در اعضای اصلی وقتی که جوش تحت هر کدام از شرایط بارگذاری طراحی، تنش های کششی را قطع کند، عمق بریدگی کناره نباید از ۰/۲۵ میلی متر بیشتر باشد. برای موارد دیگر، عمق بریدگی کناره نباید از یک میلی متر بیشتر باشد.

### د- در لوله کشی

#### طبق ASME B31.1

برای لوله کشی نیروگاه حداکثر عمق مجاز بریدگی کناره روی سطح ۰/۸ میلی متر است.

#### طبق ASME B31.3

برای لوله کشی فرایندی، معیار پذیرش بریدگی کناره را برای سرویس های مختلف عادی، سرویس سیال D، سرویس سیال M ارائه کرده است (جدول ۶).

جدول ۶- معیار پذیرش بریدگی کناره برای انواع جوش ها و شرایط سرویس

انواع جوش	سرویس عادی و M	سرویس سیال چرخه ای	سرویس سیال D
جوش محیطی و جوش انشعاب	$\leq 1\text{mm}, \leq T/4$	0	$\leq 1\text{mm}, \leq T/4$
جوش طولی	0	0	0
جوش گوشه ای	$\leq 1\text{mm}, \leq T/4$	0	$\leq 1.5\text{mm}, \leq T/4$
جوش انشعابی	-	0	$\leq 1\text{mm}, \leq T/4$

### ه- در مخزن ذخیره

#### طبق API 650

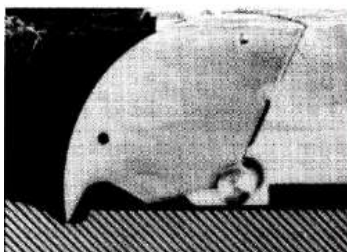
- برای اتصالات لب بلب عمودی، اتصالات دائمی عمودی، جوش های

جدول ۷- روش بازرسی نقص بریدگی کناره

Common Weld Inspection Methods Versus Discontinuities					
Discontinuities	Inspection Methods				
	RT	UT	PT	MT	VT
Cracks	O	A	A	A	A
Incomplete fusion	O	A	U	O	O
Incomplete joint penetration	A	A	U	O	O
Laminations	U	A	A	A	A
Overlap	U	O	A	A	O
Porosity	A	O	A	O	A
Slag inclusions	A	O	A	O	A
Undercut	A	O	A	O	A

A- روش پرکاربرد O- روش کم کاربرد U- معمولا کاربرد ندارد

#### UNDERCUT



شکل ۶- اندازه گیری عمق بریدگی کناره با شابلون

AS/NZS 1554-1

7-Welding and allied Processes-Classification of geometric imperfections in metallic materials Part1: Fusion Welding, ISO 6520-1

8-Welding of Pipelines and Related Facilities, API 1104

9-Bridge Welding Code- AASHTO/AWS D1.5

10-Power Piping, ASME B31.1

11-Process Piping, ASME B31.3

12-Welded Tanks for Oil Storage, API 650

13-Rules for construction of pressure vessels, ASME Section VIII, Division 1

پی نوشت

۱-انجمن جوشکاری و آزمایش های غیرمخرب ایران

منابع

1-Undercut Welding Defect:Causes, Prevention and Repair MEGMEET Welding Technology

2- Welding Undercut 101: What it is, Causes and Remedies BOYI Technology.

3-Welding Principles and Applications, Larry Jeffus

4-Welding Principles and Practices, Edward R. Bohnart

5-Structural Welding Code -Steel, AWS D1.1

6-Structural Steel Welding, Part1: Welding of Steel Structures, Australian/New Zealand Standard.



## اتصال لب به لب ورق نازک فولاد زنگ نزن ۴۳۰ با استفاده از جوشکاری قوسی میکروپلازما

محمد رضا دیانتي<sup>۱</sup>، فرشید مالک قایینی<sup>۲</sup>

### چکیده

در این پژوهش اتصال هم جنس ورق نازک فولاد زنگ نزن ۴۳۰ با استفاده از جوشکاری میکروپلازما به دلیل تراکم انرژی قوس بالا، پایداری قوس خوب، نفوذ عمیق، خلوص متالورژیکی بالا، منطقه متأثر از حرارت کم مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور دو ورق نازک فولاد ۴۳۰ با ضخامت ۰/۳ میلی متر به صورت لب به لب جوش داده شد. سپس ریزساختار و درشت ساختار حاصل با استفاده از میکروسکوپ و استریومیکروسکوپ مورد بررسی قرار گرفت و آزمون میکروسختی انجام شد. با بررسی ریزساختار حاصل مشاهده شد که با نزدیک شدن از فلز پایه به ناحیه جوش، دانه‌ها درشت شده است و همچنین مارتزیت به صورت بین دانه‌ای رسوب کرده است که سختی را در ناحیه متأثر از حرارت و جوش افزایش می‌دهد. با بررسی درشت ساختار نیز مشاهده شد که دانه‌های فلز مذاب حوضچه جوش در تماس مستقیم با دانه‌های فلز پایه به صورت اپیتکسیال رشد و جوانه زنی کرده است.

**کلمات کلیدی:** جوشکاری میکروپلازما؛ فولاد زنگ نزن فریتی؛ جوشکاری لب به لب؛ ورق نازک؛ ریزساختار.

### مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از ورق‌های نازک در صنعت به دلیل دستیابی به کیفیت عالی با وزن کم بسیار گسترش یافته است. بسیاری از تولیدکنندگان به دنبال مواد سبک و قوی‌تر برای بهبود کارایی بدون به خطر انداختن دوام، رقابت پذیری و ایمنی محصول هستند. بنابراین مواد باید قابلیت پردازش، شکل پذیری، جوشکاری، پوشش دهی و ترمیم بالا داشته باشند. فولادهای زنگ نزن دسته مهمی از آلیاژهای مهندسی است که برای طیف گسترده‌ای از کاربردها و در بسیاری از محیط‌ها استفاده می‌شود. فولادهای زنگ نزن فریتی دارای مقاومت خوبی به ترک خوردن، خوردگی تنشی، خوردگی حفره‌ای و خوردگی شیاری هستند. این فولاد در بسیاری از کاربردهایی که مقاومت به خوردگی بیش از خواص مکانیکی اهمیت داشته باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. اتصال ورق‌های نازک به دلیل پیچیدگی در حفظ ناحیه ذوب و

انجماد بخاطر نسبت سطح به حجم زیاد ورق‌های نازک، در مقایسه با اتصال ورق‌های ضخیم بسیار چالش برانگیز است. بطور کلی ورق‌هایی که ضخامت آن‌ها تا ۲ میلی متر است به عنوان ورق‌های نازک معرفی می‌شوند. چالش‌هایی که هنگام جوشکاری ورق‌های نازک پیش می‌آید با مقدار گرمای ورودی مرتبط است. گرمای کنترل نشده و بیش از حد ارائه شده با گازهای بی اثر، منجر به مشکلات زیادی در جوشکاری ورق‌های نازک از جمله سوراختگی، پیچیدگی، تخلخل، کمانش، پیچ خوردگی و پیچش ورق‌های جوش داده شده، درشت شدن دانه، تبخیر سایر عناصر مفید موجود در پوشش ورق‌ها، تغییر گپ اتصال در هنگام جوشکاری و غیره می‌شوند. که انتخاب فرایند و روش پیوستن مناسب می‌تواند تا حد قابل توجهی از این مسائل مراقبت کند [۲، ۳]. یکی از مهمترین فرایندهایی که در اتصال ورق‌های نازک استفاده می‌شود جوشکاری قوسی میکروپلازما (MPAW) است.

جوشکاری قوسی میکروپلازما را می توان به عنوان یک فرایند جوشکاری قوسی با گاز محافظ تعریف کرد که در آن اتصال دائمی فلزات از طریق گرمای منتقل شده بوسیله یک قوس که بین الکتروود تنگستن و قطعه کار ایجاد می شود، حاصل می شود [۴]. مهم ترین مزیت روش جوشکاری فوق الذکر نسبت به سایر فرایندهای جوشکاری مانند جوشکاری پرتوی لیزر (LBW) و جوشکاری پرتو الکترونی (EBW) تجهیزات ارزان قیمت آن است. که کاربردهای این فرایندهای جوشکاری را در بسیاری از صنایع افزایش می دهد. و هزینه های مربوط به ساخت اتصالات را کاهش می دهد بدون اینکه کیفیت آن ها به خطر بیافتد [۵]. در این راستا، فرایند جوشکاری قوسی میکروپلازما یکی از کاربردی ترین روش های جوشکاری برای اتصال ورق های نازک ۴۳۰ است. MPAW به دلیل تراکم انرژی قوس بالا، پایداری قوس خوب، نفوذ عمیق، خلوص متالورژیکی بالا، منطقه متأثر از حرارت کم برای جوشکاری دقیق ورق نازک بدون پیچیدگی بسیار محبوب است. این فرایند نیازی به آماده سازی طرح اتصال گران قیمت ندارد [۵].

با این وجود، علیرغم مزایای آن، مقالات منتشر شده نسبتاً کمی در مورد جوشکاری میکروپلازما از جمله تأثیرات فرایند MPAW بر خواص مکانیکی و متالورژی ورق نازک زنگ نزن ۴۳۰ موجود است. کیفیت به طور قابل توجهی به ساختار دانه مانند اندازه دانه و جهت دانه بستگی دارد. ساختارهای دانه ای که در فرایند جوشکاری ایجاد می شوند، نه تنها با توجه به خصوصیات مواد و شرایط محیطی، بلکه همچنین شرایط فرایند، مانند حرارت ورودی، سرعت جوشکاری، فاصله نازل تا قطعه کار و غیره تعیین می شوند. بنابراین، یافتن شرایط جوشکاری مناسب برای بدست آوردن کیفیت جوشکاری مطلوب و جلوگیری از ایجاد نقص برای کاربردهای موفقیت آمیز آن بسیار مهم است.

محسن علی و همکارانش [۶] از جوشکاری میکروپلازما برای اتصال ورق های نازک از فولاد زنگ نزن استنیتی **AISI 316L** با ضخامت **1 mm** استفاده کرد. آن ها تأثیر فاکتورهای میکرو پلازما (قطر الکتروود ۲/۴ میلی متر) بر پارامترهای هندسه حوضچه جوش یعنی عرض و ارتفاع ناحیه ذوب و عرض **HAZ** ورق های فولاد زنگ نزن بررسی کردند. مدل های ریاضی با استفاده از روش سطح پاسخ توسعه یافته اند، که در آن از سه عامل، سه سطح و طرح مرکب مرکزی برای توسعه مدل های ریاضی، ترکیب پارامترهای میکروپلازما و هندسه حوضچه جوش استفاده شده است. کفایت مدل ها با استفاده از روش **ANOVA** بررسی شد. تغییرات اصلی خروجی با متغیرهای فرایند ورودی در هر دو اثر بحث شد: اصلی و تعامل. در نتیجه، پارامترهای هندسه حوضچه جوش را می توان با استفاده از مدل های ریاضی توسعه یافته تخمین زد.

تام و همکارانش [۷] به طور تجربی و نظری جوشکاری مکانیزه پلازما ورق نازک فولاد کم کربن با طرح اتصال لب به لب را بررسی کردند. آن ها از مقایسه توزیع دمایی گذرا به کمک مدل تحلیلی روزنتال با نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل المان محدود دریافتند که مقادیر نظری کاملاً با آنچه از آزمایش های جوشکاری بدست آمده مطابقت دارد.

پراسماد و همکارانش اثرات پارامترهای فرایند جوشکاری میکروپلازما پالسی یعنی جریان پایه، پیک جریان و پهنای پالس را بر ویژگی های کیفیت جوش مانند ریزساختار، هندسه حوضچه جوش، اندازه دانه، خواص کششی و سختی ورق نازک **SS 304L** مطالعه کردند.

نتایج نشان داد که مقادیر سختی و خواص کششی ناحیه جوش نسبتاً بهتر از ناحیه فلز پایه است. همچنین به دلیل کوچک تر بودن اندازه دانه در منطقه ذوب نسبت به منطقه تحت تأثیر حرارت، منطقه جوش از فلز اصلی قوی تر است [۸]. همچنین آن ها برای ورق های **SS304L** با ضخامت ۰/۲۵ میلیمتر که توسط فرایند **MPAW** جوش داده شده اند (شکل ۲-۹)، مدل های ریاضی توسعه دادند که برای پیش بینی پارامترهای هندسه حوضچه جوش مبتنی بر طراحی فاکتوریل و روش سطح پاسخ توسعه یافته بود؛ مدل های توسعه یافته را با روش تجزیه و تحلیل واریانس بررسی کردند. تأثیر پارامترهای میکروپلازما پالسی بر هندسه حوضچه جوش که با مدل بدست آمده بود با دقت بالایی با مقادیر واقعی تأیید شد [۹، ۳].

در روند جوشکاری ذوبی با کاهش ضخامت قطعه کار مشکلات افزایش می یابد. بنابراین، طراحی و توسعه تجهیزات مناسب برای جوشکاری موفق ورق های نازک با استفاده از فرایند **MPAW** مورد نیاز است.

اثرات پارامترهای فرایند جوشکاری بر خواص مکانیکی، مشخصه های ریزساختاری و نفوذ جوش ها برای فهم بهتر فرایند باید بررسی شود. بنابراین مهمترین هدف از کار حاضر بررسی ریزساختاری و کیفیت جوش ورق های نازک **430SS** جوشکاری شده با جوشکاری قوسی میکروپلازما است.

### مواد و روش پژوهش

در تحقیق حاضر از دو ورق نازک فولاد زنگ نزن فریتی ۴۳۰ هر کدام با ضخامت ۳۰۰ میکرومتر و ابعاد  $70 \times 30 \text{ mm}^2$  برای جوشکاری لب به لب استفاده شده است. لبه سازی و برش ورق ها با گیوتین انجام شده است. آنالیز ترکیب شیمیایی به روش طیفسنجی نشر جرقه ای انجام شده که نتایج آن در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱- آنالیز ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن فریتی ۴۳۰ به روش طیفسنجی نشر جرقه ای (درصد وزنی)

عنصر	C	Cr	Mn	P	Si	S	Fc
درصد وزنی	۰/۰۵	۱۷/۱۴	۰/۴۹	۰/۰۲	۰/۲۹	≤ ۰/۰۳	Balance

دستگاه جوشکاری مورد استفاده برای مطالعه **HBM 50** ساخت کشور چین است. منبع تغذیه یک منبع جریان ثابت ۵۰-۱ آمپر است. از الکتروود تنگستن به قطر ۱/۲ میلی متر و زاویه نوک ۲۰ درجه به همراه نازل مسی به قطر ۱/۲ میلی متر استفاده می شود. از گاز آرگون به عنوان گاز پلازما و محافظ و پرچینگ استفاده شد. جزئیات عواملی که برای آزمایش در نظر گرفته شده است، در جدول (۲) نشان داده شده است.



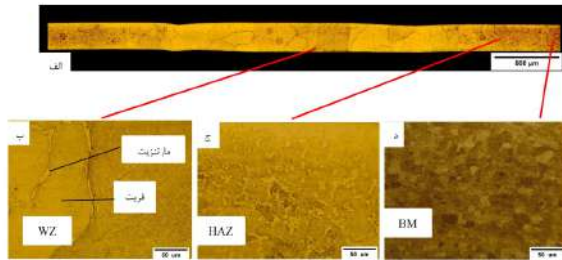
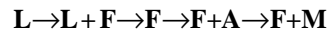
جدول ۲- جزئیات شرایط جوشکاری

پارامتر	مقدار
قطبیت	DCEN
حالت عملکرد	پوسته
گاز پلاسما و محافظ و پرچینگ	آرگون با خلوص ۹۹/۹٪
جریان گاز پلاسما هنگام جوشکاری	۰/۸ لیتر بر دقیقه
جریان گاز محافظ هنگام جوشکاری	۱۰ لیتر بر دقیقه
جریان گاز پرچینگ هنگام جوشکاری	۱۵ لیتر بر دقیقه
قطر نازل مسی	۱/۲ میلی‌متر
جنس قطعه کار	SS 430
ضخامت قطعه کار	۰/۳ میلی‌متر
قطر الکترود تنگستن	۱/۲ میلی‌متر
زاویه نوک الکترود	۲۰ درجه
فاصله نوک الکترود تا قطعه کار	۲/۲ میلی‌متر
دمای واحد خنک کننده	۲۵ °C
زاویه مشعل جوشکاری با قطعه کار	۲۰ درجه
سرعت جوشکاری	۱۲۰ میلی‌متر بر دقیقه
جریان جوشکاری	۱۰/۴ آمپر

میکروسختی سنجی با استفاده از دستگاه MICROMET BUEHLER با روش ویکرز و با نیروی ۳۰۰ گرم و مدت زمان ۱۵ ثانیه و با استفاده از استاندارد ASTM E384 انجام شد.

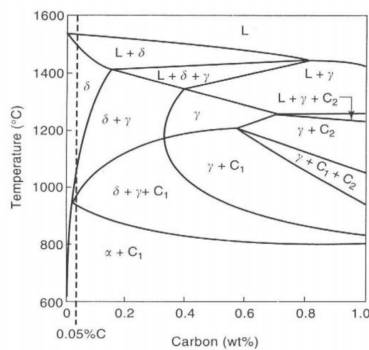
### نتایج و بحث

ریزساختار فلز پایه، ناحیه جوش و ناحیه متأثر از حرارت در شکل (۲) نشان داده شده است. در بین دانه‌های ناحیه جوش و ناحیه متأثر از حرارت رسوباتی به صورت تیغه‌ای مشاهده شد. سیستم سه تایی Fe-Cr-C می‌تواند برای توضیح استحاله‌های فازی در فولادهای زنگ نزن فریتی استفاده شود. نمودار شبه دوتایی فولاد ۴۳۰ با ۱۷٪ کروم با تاکید بر مقدار کربن اسمی ۰/۰۵ درصد وزنی در شکل (۳) آورده شده است و احتمالاً مسیر استحاله به صورت زیر بوده است:



شکل ۲- ریزساختار جوش لب به لب ورق نازک فولاد زنگ نزن ۴۳۰ با ضخامت ۳/۰ میلی‌متر؛ الف- نمای کلی از تمام جوش؛

ب- ریزساختار ناحیه جوش (WZ)؛ ج- ریزساختار ناحیه متأثر از حرارت (HAZ)؛ د- ریزساختار مربوط به فلز پایه (BM).



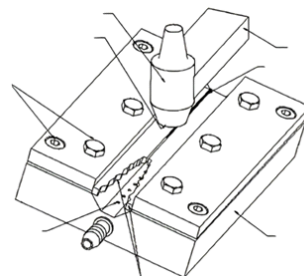
شکل ۳- نمودار شبه دوتایی ۱۷٪ کروم [۱]

طی سرمایش، در دمای بالا مقداری آستنیت در طول مرزدانه‌های فریت تشکیل می‌شود. این آستنیت هنگام سرد شدن منطقه ذوب تا دمای محیط به مارتنزیت تبدیل می‌شود. این توالی از نمودار شبه دوتایی شکل (۳) قابل استنباط است.

از طرفی کالتهایسر [۱۰] معادله ای را برای تخمین تشکیل مارتنزیت در فولادهای زنگ نزن فریتی ایجاد کرد که به عنوان فاکتور کالتهایسر یا عامل K شناخته می‌شود و در رابطه (۱) آورده شده است:

یک فیکسچر اختصاصی برای نگهداری و قرارگیری مناسب قطعه کار برای انجام آزمایش جوشکاری طراحی و ساخته شده است. همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است دو صفحه گیره با کمک پیچ و صفحه پستی از جنس مس در پایین ورق های قطعه کار محکم می‌شوند تا از پیچیدگی قطعه کار در طول فرایند جوشکاری جلوگیری نمایند. همچنین این قید و بند قابلیت پاکسازی پشت حوضچه جوش به منظور پاکسازی هوای زیر ورق از هوای موجود و جایگزینی آن با گاز خنثی جهت محافظت از قسمت پستی حوضچه جوش فراهم می‌آورد.

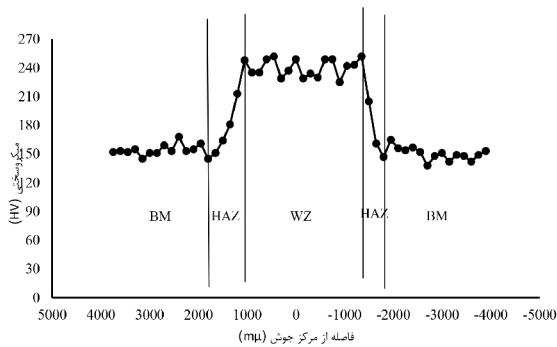
قبل از انجام جوشکاری جهت از بین بردن چربی‌ها و آلودگی‌ها، ورق‌ها با استون تمیز شدند. همچنین در ابتدا جوشکاری از طریق سعی و خطا به صورت خودزا بر روی تک ورق انجام شد تا پارامترهای مناسب جهت یک اتصال لب به لب که از نظر ظاهری سالم و نفوذ کامل است بدست آمد. جهت به دست آوردن تصاویر متالوگرافی استفاده از سمباده های ۸۰، ۴۰۰، ۸۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۵۰۰ با استفاده از استاندارد ASTM E3-11 سمباده زنی و سپس پولیش مکانیکی انجام شد. جهت حک کاری شیمیایی و به دست آوردن تصاویر ریزساختاری منطقه اتصال، از محلول اچانت Kalling No.2 حاوی ۱ گرم CuCl<sub>2</sub>، 20 میلی لیتر اتانول و ۲۰ میلی لیتر هیدروکلریک اسید استفاده شد. سپس با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل OLYMPUS UMSSPG تصاویر متالوگرافی از سطح مقطع منطقه اتصال گرفته شد.



شکل ۱- فیکسچر مورد استفاده برای انجام جوشکاری ورق نازک به صورت لب به لب



روند سختی را در مکان های مختلف نشان می دهد. مارتنزیت های بین دانه ای که در طول چرخه گرمایش ایجاد می شوند، سختی را در ناحیه تحت تأثیر حرارت و جوش افزایش می دهند. لیبولد و کوتکی [۱] گزارش داد که مارتنزیت های تشکیل شده در فولاد زنگ نزن فریتی، کم کربن بوده و سختی آن کاهش یافته است.



شکل ۵- نمودار پروفیل سختی جوش لب به لب ورق نازک زنگ نزن ۴۳۰ جوشکاری شده با جوشکاری میکروپلازما

### نتیجه گیری

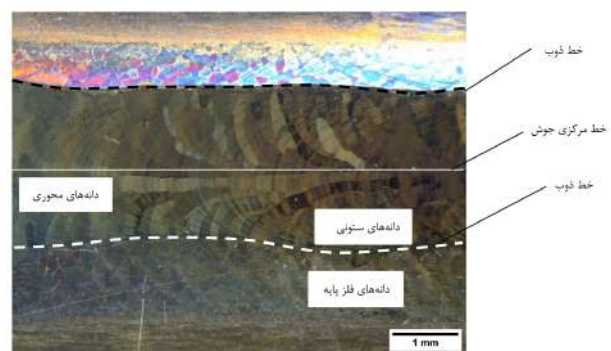
- با استفاده از پارامترهای بدست آمده یک اتصال سالم از نظر عیوب ظاهری و ترک بدست آمد.
- با حرکت از سمت فلز پایه تا ناحیه جوش اندازه دانه ها افزایش یافته است.
- بررسی های ماکروساختاری نشان داد که رشد در ناحیه ذوب از فصل مشترک به صورت صفحه ای شروع شده است که از نوع اپیتکسیال و در ادامه به صورت رقابتی است.
- پروفیل سختی نشان می دهد که سختی در ناحیه متأثر از حرارت و منطقه ذوب افزایش یافته است که به دلیل رسوب مارتنزیت در بین دانه های فریت است.

### منابع

- 1-Lippold, J.C. and D.J. Kotecki, Welding metallurgy and weldability of stainless steels. 2005.
- 2-Balasubramanian, M., V. Jayabalan, and V. Balasubramanian, Effect of process parameters of pulsed current tungsten inert gas welding on weld pool geometry of titanium welds. Acta Metall. Sin.(Engl. Lett.), 2010. 23(4): p. 312-320.
- 3-Prasad, K.S., C.S. Rao, and D.N. Rao, Prediction of weld pool geometry in pulsed current micro plasma arc welding of SS304L stainless steel sheets. International Transaction Journal of Engineering, Management & Applied Sciences & Technologies, 2011. 2(3): p. 325-336.
- 4-Committee, A.I.H., ASM Handbook, Vol. 6, Welding, brazing, and soldering. ASM International, Materials Park, Ohio, 1997: p. 88.
- 5-Prasad, K.S., C.S. Rao, and D.N. Rao, Advances in plasma arc welding: a review. Journal of Mechanical Engineering and Technology (JMETS), 2012. 4(1).
- 6-ALI, M., A. ALMALEH, and A. RASSIS, Studying Factors Affecting Fusion Pool Geometry of Micro Plasma Arc which Remelts Austenitic

فاکتور **K** دارای مقدار بحرانی ۱۳ و ۱۷ برای فولادهای زنگ نزن فریتی کم کربم و متوسط کربم برای جلوگیری از تشکیل مارتنزیت است. در تحقیق حاضر از فولاد زنگ نزن فریتی کربم متوسط ۴۳۰ استفاده شده است و مقدار محاسبه شده **K** برای آن برابر با 15/31 است که از مقدار بحرانی ۱۷ کمتر است و بنابراین تشکیل مقداری مارتنزیت در ریزساختار نوری جوش را تصدیق می کند.

در شکل (۴) درشت ساختار فلز جوش آورده شده است. فلز مذاب حوضچه جوش در تماس مستقیم با دانه های فلز پایه قرار دارد، دانه های فلز پایه در خط ذوب به عنوان زمینه جوانه زنی عمل کرده است و فلز مذاب بدون تغییر جهت های بلوری بر روی دانه های فلز پایه قرار گرفته است که این حالت رشد و جوانه زنی را اپیتکسیال نامیده می شود. بنابراین می توان گفت، مذاب فلز جوش، در جهت کریستالوگرافی دانه های فلز پایه در مرز ذوب منجمد می شود و جهت کریستالی دانه های فلز جوش مطابق جهت کریستالی دانه های فلز پایه است اما در فواصل دورتر از خط ذوب رشد دانه ها از نوع رقابتی است زیرا در حین انجماد فلز جوش، دانه ها به رشد در جهت عمود بر حوضچه به دلیل وجود بیشترین گرادیان دمایی و در نتیجه بیشترین میزان خروج حرارت تمایل دارند اما دندریت های ستونی یا سلول های درون هر دانه به رشد در جهت رشد آسان متمایل هستند و این در واقع همان رشد رقابتی بین جهت رشد آسان و رشد در جهت عمود بر حوضچه مذاب است. همچنین با توجه اینکه دانه های ستونی در جهت عمود بر مرز حوضچه رشد می کنند و علاوه بر آن دانه های محوری هم در خط مرکزی جوش مشاهده می شود می توان گفت که احتمالاً شکل حوضچه مذاب به شکل بیضوی نزدیک تر از است و این نشان دهنده آن است که سرعت جوشکاری و حرارت ورودی به نسبت کم بوده است



شکل ۴- درشت ساختار جوش لب به لب ورق نازک فولاد زنگ نزن ۴۳۰ جوش داده شده توسط جوشکاری میکروپلازما

### تجزیه و تحلیل میکرو سختی

اندازه گیری سختی در سراسر ناحیه جوش داده شده همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است، انجام شد، جایی که نواحی مختلف در ناحیه جوش مانند HAZ، FZ و BM شناسایی می شوند. شکل

9-Prasad, K.S., C.S. Rao, and D.N. Rao, Study on factors effecting weld pool geometry of pulsed current micro plasma arc welded AISI 304L austenitic stainless steel sheets using statistical approach. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2012. 11(08): p. 790.

10-Kaltenhauser, R., Improving the engineering properties of ferritic stainless steels. *Metals Eng Quart*, 1971. 11(2): p. 41-47.

پی نوشت

- 1- دانشجوی کارشناسی ارشد بخش مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
- 2- دانشیار بخش مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران؛

Stainless Steel Sheets (AISI 316L) by Using Response Surface Method. ??, 2018. 67(6): p. 646-652.

7-Tam, S., L.-E. Lindgren, and L. Yang, Computer simulation of temperature fields in mechanised plasma-arc welding. *Journal of Mechanical working technology*, 1989. 19(1): p. 23-33.

8-Prasad, K.S., C.S. Rao, and D.N. Rao, A study on weld quality characteristics of pulsed current micro plasma arc welding of SS304L sheets. *International Transaction Journal of Engineering, Management & Applied Sciences & Technologies*, 2011. 2(4): p. 437-446.



## بازسازی تیغه های نوردی از جنس فولاد 2550/1 با فرایند SMAW با استفاده از الکتروود E6UM60

اکبر عباسیان<sup>۱</sup>، حسن شریفی<sup>۲</sup>، محمد عرفان منش<sup>۳</sup>

### چکیده

سایش قطعات و تجهیزات صنعتی در مجموعه های صنعتی یکی از مهمترین معضلات بخش صنعت و معدن می باشد و کمتر صنعت گری است که درگیر این مسئله نباشد. سایش در شرایط حاد و بحرانی می تواند باعث شکست و از کار افتادگی قطعه و دستگاه گردد که در این صورت هزینه های سنگینی به دوش تولید کنندگان ناشی از توقف و عقب افتادگی تولید می گذارد. در این پژوهش اعمال یک سطح فلز سخت با فرایند SMAW با استفاده از الکتروود E6UM60 روی فلز پایه ۱/۲۵۵۰ بررسی شد. پارامترهای مختلفی نظیر نوع الکتروود، زیرلایه رقیق کننده، پیش گرمایش، پس گرمایش و همچنین عملیات حرارتی در نمونه های مختلف انجام شد و بهترین نتایج مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت. نمونه هایی بشکل قرص به قطر ۵۰ میلی متر با روش بهینه بدست آمده تهیه شد و پس از جوشکاری و عملیات حرارتی تست سایش برای نمونه های جوشکاری شده و نمونه خام به عنوان نمونه شاهد انجام شد و نتایج مقایسه گردید. مشاهده گردید نمونه تعمیر شده از نظر مقاومت سایشی و مقدار سختی از نمونه خام شرایط بهتری دارد. با بررسی نتایج و تحلیل داده ها می توان بخش بزرگی از فولادهای ابزار آسیب دیده را تعمیر و دوباره به خط تولید بازگردانید.

**کلمات کلیدی:** روکش کاری، بازسازی، جوشکاری SMAW، الکتروود E6UM60.

### مقدمه

فولاد های ابزار نقش مهم و اساسی، در پیشرفت دنیا ایفا نموده اند. از سال ۱۷۰۰ میلادی، انسان به فکر استفاده از فولاد جهت ساخته سازه ها و ابزارها افتاد. استفاده از عناصر آلیاژی در تهیه فولادهای ابزار به اواخر قرن ۱۹ میلادی بر میگردد که در حقیقت آغاز توسعه فولادهای صنعتی و کاربردی می باشد. اکثر قطعات صنعتی نیاز به مقاومت در برابر سایش بالا دارند تحت تأثیر خوردگی محیط و سایش قرار می گیرند. آسیب ناشی از ترکیب هر دو فرایند بر روی مواد باعث بوجود آمدن زیان اقتصادی هنگفتی در صنایع می شود. بدین منظور پوشش های سخت به طور گسترده ای به عنوان راه حل مهندسی برای افزایش کیفیت و طول عمر اجزایی که در شرایط سایش همراه با خوردگی کار می کنند استفاده می شود. همچنین

قطعاتی که دچار سایش، خوردگی و شکست می شوند. در بسیاری موارد امکان جایگزینی قطعه کاملاً مشابه وجود ندارد. این موضوع در مواردی که صنعت یا قطعه قدیمی باشد بیشتر صدق می کند. با توجه به اینکه در تعمیر قطعات می توان نواقص و نقاط ضعف اصلی را بر طرف کرد، قطعه تعمیر شده می تواند کارایی بهتری داشته باشد. همچنین کاهش زمان توقف و رفع نیاز خرید قطعه جدید، باعث می شود هزینه توقف خط تولید کاهش می یابد [۸]. امروزه ساده ترین و پر کاربردترین تکنیک ها برای اعمال چنین پوشش هایی جوشکاری است. جوشکاری تعمیری یکی از فرایندهای مهم نگهداری و تعمیرات است که شامل جوشکاری ترمیمی و سطح پوشانی می گردد. روکش دهی سخت با استفاده از فرایندهای جوشکاری به عنوان یکی از مؤثرترین و اقتصادی ترین روش های

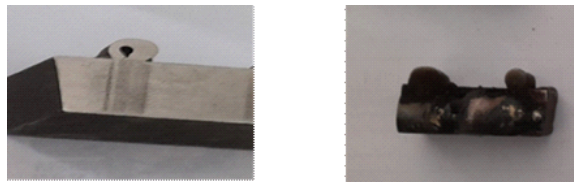
زیر لایه و بدون پیش گرم با دستگاه جوش رکتی فایر خزر جوشکاری انجام شد. مرحله دوم با توجه به نتایج بدست آمده تست مرحله اول با الکتروود E6UM60، و با استفاده از الکتروود زیر لایه E1803J و بدون پیش گرم جوشکاری انجام شد. الکتروود زیر لایه بایستی رقت فلز جوش را کاهش دهد.

مرحله سوم با الکتروود E6UM60 و با استفاده از الکتروود زیر لایه E1803J جوشکاری انجام شد. نمونه در دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد در کوره المنتی با دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت، پیش گرم شد و سپس ضمن کنترل دمای قطعه با ترمومتر مادون قرمز جوشکاری انجام شد.

مرحله چهارم نمونه با الکتروود E6UM60 و با استفاده از الکتروود زیر لایه و با پیش گرم در دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد در کوره المنتی به مدت یک ساعت، جوشکاری انجام شد. در هنگام پیش گرم و قبل از جوشکاری دمای قطعه با ترمومتر مادون قرمز کنترل شده و جوشکاری انجام شد.

### نتایج و بحث

با توجه شکل (۱) ترشوندگی فلز جوش پایین فلز جوش مشهود است. در این مرحله جوشکاری با الکتروودهای بسیار سخت بوده و افزایش در تدریجی آمپر نیز کمکی به ترشوندگی نکرد.



شکل ۱- عدم ترشوندگی نمونه در مرحله اول

نتایج مرحله دومین مرحله با توجه به نوع الکتروودها و فلز پایه پس از برش مقطع جوش ترک بین فلز جوش و فلز پایه مشاهده شد (شکل ۲).



شکل ۲- ترک در مرحله دوم

در مرحله سوم جوش نمونه ها بدون ترک و عیوب ظاهری بدست آمد. نمونه ها پس از برش از مقطع جوش تست سختی سنجی انجام شد و نتایج نشان می دهد که سختی فلز جوش و فلز پایه بدلیل فازهای آستنیت باقیمانده مناسب نبوده و پایین بوده است. به همین دلیل در مرحله چهارم عملیات سخت کردن پس از جوشکاری انجام شد.

شکل (۳) تست میکروسختی نمونه از منطقه فلز پایه به طرف

عملیات سطحی جهت بهبود خواصی چون سختی، سایش، ضربه و غیره به کار می رود. به دلیل چسبندگی خوب روکش به فلز پایه و نرخ رسوب گذاری بالا، موجب شده است که از این روش برای روکش دهی و مقاوم سازی سطح فلز پایه استفاده نشود. در روکش دهی با استفاده از جوشکاری به دلیل اختلاط روکش و فلز پایه در منطقه کوچکی، پیوند قوی بین روکش و فلز پایه حاصل می گردد که سبب کاربرد آن ها حتی در دماهای بالاتر شده است. لازم به ذکر است که مهمترین تفاوت بین روکش دهی با استفاده از جوشکاری با سایر روش های روکش دهی در درصد رقت ۱ یا تغییر ترکیب شیمیایی فلز پایه در اثر امتزاج با فلز پرکننده است. یکی از پارامترهای بسیار مهم در فرایند سختکاری سطحی درصد رقت می باشد. رقت به صورت نسبت فلز پایه ذوب شده به فلز جوش تعریف می شود و بیانگر مقدار فلز پایه یا پاس قبلی وارد شده به روکش می باشد حوضچه جوش و پارامترهای هندسی مربوط به آن در شکل (۱) نشان داده شده است. در این پژوهش به منظور بازسازی تیغه های فرسوده و ساییده شده به صورت راهکارهایی افزایش سختی سطحی در جهت بهبود رفتار سایشی با استفاده از فرایند جوشکاری با الکتروود دستی مورد ارزیابی واقع شد. فولاد سردکار با نام ۱/۲۵۵۰ تهیه شد و ترکیب شیمیایی آن با استفاده روش آنالیز طیف نوری (کوانتومتری) مطابق جدول (۱) بدست آمد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد بدست آمده از کوانتومتری

عنصر	C	Si	Cr	W	V	Mn	P	S	Ni
درصد	۰.۶	۰.۶۵	۱.۱	۱.۹	۰.۲	۰.۳	۰.۰۳	۰.۰۳	۰.۱

مشکل اصلی در جوشکاری این فولادها، سخت شدن و ترک برداشتن جوش و ناحیه تحت تاثیر حرارت آن است. به عنوان یک قاعده کلی در جوشکاری فولادهای کم آلیاژ فقط بایستی از الکتروودهای کم هیدروژن استفاده کرد. اما در انتخاب الکتروود، تطبیق دقیق خواص الکتروود با فولاد پایه بسیار اهمیت دارد. الکتروودها اغلب برای جریان خاصی طراحی می شوند. اما فقط در صورت استفاده از قطب مناسب بازدهی خوب خواهند داشت. قطب نامناسب علاوه بر کاهش بازدهی و کیفیت جوش، بکارگیری الکتروود را سخت می کند و جوش از ظاهر خوبی برخوردار نخواهد شد. توصیه می شود که همواره قطب و نوع جریان الکتریکی پیشنهادی کارخانه سازنده رعایت گردد. استفاده از الکتروودهای سختکاری با ترکیب پودری متفاوت از عنصر آلیاژی کروم که در این حال با ایجاد یک لایه روکش سخت بر روی قطعه هم جبران کاهش ضخامت از دست رفته شود و هم میزان مقاومت به سایش قطعه افزایش یابد. در جدول (۲) مشخصات الکتروود استفاده شده آمده است.

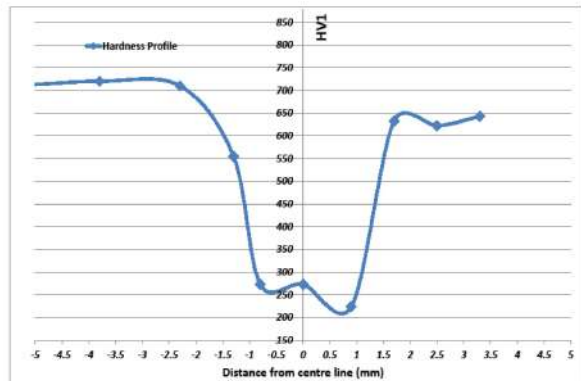
جدول ۲- مشخصات الکتروود استفاده شده

شماره	نام تجاری الکتروود	نام استاندارد	مورد استفاده	قطر (mm)	ترکیب شیمیایی (wt%)						
					Fe	Mo	Ni	Cr	Si	Mn	C
۲	AS SD-60	E6-UM-60	پرکننده	۲/۱۵	-	-	۶	۰/۴	۰/۵	۰/۴	۰/۶۰

### مراحل انجام کار

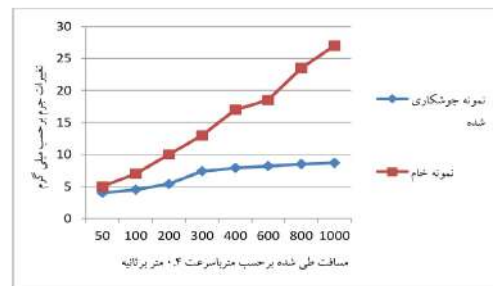
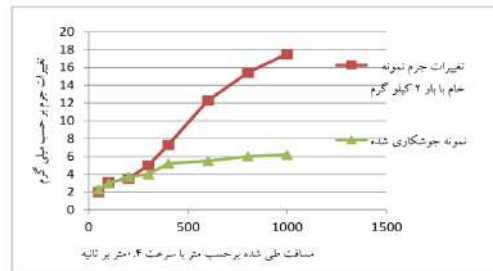
مرحله اول نمونه با الکتروودهای E6UM60 بدون استفاده از الکتروود

فلز جوش را در مرحله چهارم نشان می دهد. در این شکل سختی از حدود ۶۰ راکول سی در منطقه فلز پایه منطقه HAZ به حدود ۲۵ راکول سی در منطقه زیر لایه و دوباره به ۶۰ راکول سی در منطقه جوش رسیده است.



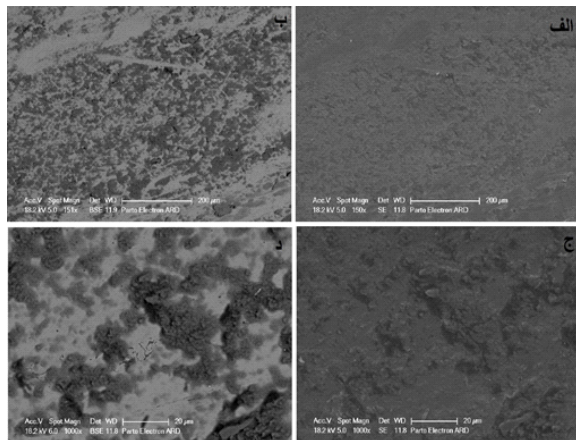
شکل ۳- نمودار تست میکرو سختی که منطقه HAZ صفر محور فاصله قرار دارد

در محله چهارم تست سایش پین روی دیسک، طبق استاندارد **ASTM G99**، در شرایط دمایی محیط با دستگاه تست سایش پین روی دیسک دارای یک دیسک گردان که یک پین از جنس فولاد بلبرینگ ۵۲۱۰۰ با سختی ۶۴ راکول سی و زبری سطح ۰٫۰۵ میکرومتر و شعاع سر پین ۱۰ mm عامل ساینده با نیروی مشخصی با نمونه در تماس است، انجام شد. برای استفاده از این دستگاه نمونه باید بر اساس شرایط استاندارد آماده و روی دستگاه قرار گیری و پس از اعمال نیروی مورد نظر عامل ساینده بر دیسک ساییده می شود. در شکل شماره ۴ نمودار کاهش وزن با مسافت های متفاوت طی شده با بار ۲ کیلوگرم و نمودار کاهش وزن با مسافت های متفاوت طی شده با بار ۲ کیلوگرم بیان شده است.



شکل ۴- کاهش وزن با بار ۲ کیلوگرم و با بار ۲ کیلوگرم با مسافت های طی شده متفاوت

تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح سایش نمونه ها در شکل (۵) نشان می دهد که سطح نمونه ها دارای شخم کم عمق و باریک و ناپیوسته شده است. می توان نتیجه گرفت که پدیده سایش در این نمونه ابتدا با مکانیزم سایش خراشان دو جسمی از نوع خیش ریز که در اثر سختی بالای روکش ایجاد می شود شروع شده و سپس، به علت وجود لایه های که می تواند از پین ساینده یا از سطح روکش باشد که بر سطح لهیده و چسبیده شده است، به تغییر مکانیزم سایش، از سایش خراشان دو جسمی به سایش چسبان سه جسمی اشاره کرد. اما با توجه به کندگی ها و شیارهایی که در سطح نمونه دیده می شود. می توان مکانیزم غالب سایشی در این نمونه را مکانیزم برش ریز، ناشی ریز ترک ها که در اثر تغییر شکل، در لایه های سطحی به وجود آمده و به هم متصل شده و موجب کندگی های بسیار ریز در مسیر سایش می شود دانست.



شکل ۵- سطوح سایش در بزرگنمایی مختلف

### نتیجه گیری

با بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی و مکانیزم سایش در این نمونه را می توان با توجه به سختی بالا در این روکش و همچنین احتمال زمینه مارتنزیتی در ریزساختار این نمونه که احتمال شکل گیری کاربیدهای کرم و کاربیدهای آهن بسیار زیاد است و با توجه مقدار زیاد اکسیژن در آنالیز می توان گفت سایش چسبان هم پس از سایش خراشان انجام شده است.

در این پژوهش به منظور بدست آوردن یک پوشش تعمیری مناسب از الکتروود سخت کاری **E6UM60** استفاده شد. الکتروود ها سختی مناسبی را بدست آورد. الکتروود زیر لایه حتما بایستی استفاده شود. عدم استفاده از الکتروود زیر لایه باعث ایجاد ناپیوستگی های ظاهری و داخلی می شود. با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق می توان قطعات صنعتی را طی همین فرایند بازسازی کرد.

نمونه بازسازی شده در آزمون سایش نتایج بهتری نسبت به نمونه خام سخت شده بدست آورد. و در مسافت های زیادتر این اختلاف بیشتر شد که می تواند عمر تیغه را به اندازه ای قابل توجه افزایش دهد. با توجه به این که فرایند جوشکاری **SMAW** نسبت به دیگر فرایندها ارزان تر است باعث رغبت به بازسازی تیغه های فرسوده

می شود.

p. 3259-3264

7-Tool steel". Wikipedia. 2019-02-07.

8-E.N. Gregory, Selection Of Materials for Harfacing The Welding Institute, Weld Surfacing and Harfacing Cambridge, Abington 1980, 22-27.

9-K. A. Mumtaz, and N. Hopkinson, Laser melting functionally graded composition of waspaloy and zirconia powders, Journal of Materials Science 42(2007) 7647-7656.

10-V.K. Sarin, Comprehensive Hard Materials, First Edition, Elsevier, 2014.

11-M.W. Richert, A. Mazurkiewicz, J.A. Smolik, The deposition of WC-Co coating by EBPVD technique, Archives of metallurgy and materials 57 (2012) 519-5

.....

#### پی نوشت

1- دانشجوی کارشناسی ارشد بخش مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

2- دانشیار بخش مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران؛

#### منابع

1- Roberts, G., Kennedy, R., Tool Steels, 5ed, ASM International (1998)

2-ASM Handbook. Vol. 9. (1993)

3-Linnert, G.E., Welding Metallurgy 4ed. Vol. 1., AWS Publication(1997)

4- Morisada, Y., et al., Nanostructured tool steel fabricated by combination of laser

melting and friction stir processing. Materials Science and Engineering: A, 2009. 505(1-2): p. 157-162

5-J.R. Davis, Hardfacing, Weld Cladding, and Dissimilar Metal Joining, Metals Handbook 10th, Vol. 6, American Society for Metals, 1997

6-Akhbarizadeh, A., Shafyei, A., Golozar, M.A., Effects of cryogenic treatment on wear behavior of D6 tool steel. Materials & Design, 2009. 30(8):



## بررسی و انجام آزمون‌های غیر مخرب کوره‌های نم زدایی گاز یک واحد پالایشگاهی به منظور شناسایی و پیشگیری از عوامل تخریب

محمدحسین خواجه محمدی<sup>۱</sup>، حسین نجفی محترم<sup>۲</sup>، بنیامین پیری<sup>۳</sup>، مهدی باقرزاده<sup>۴</sup>، محمدجواد حسینی<sup>۵</sup>، اکبر سرخوش<sup>۶</sup>، صائب مهارتی آذر نوز<sup>۷</sup>، حسین رادمهر<sup>۸</sup>

### چکیده

هیترها در صنایع پالایشی نقش مهمی در افزایش دمای سیال فرایندی داخل تیوب‌ها ایفا می‌کنند. در مواردی که سیال داخل تیوب‌ها قابلیت اشتعال و انفجار داشته باشد بازرسی و پایش این نوع از هیترها اهمیت بالایی برخوردار می‌گردد. در این راستا در پژوهش حاضر به ارزیابی وضعیت هیترهای واحد نم زدایی گاز یک پالایشگاه گاز پرداخته شده است. بازرسی‌های انجام شده در شرایطی که هیتر مذکور در حسین و خارج از سرویس بود، انجام پذیرفت. تیوب‌های هیتر در دو بخش **Convection** و **Radiation** در نقاط تعیین شده با روش‌های ترموگرافی، بازرسی چشمی، ضخامت سنجی آلتراسونیک، متالوگرافی **Replica** و آنالیز دمای سطح تیوب‌ها تحت بازرسی قرار گرفتند. نتایج ترموگرافی و ضخامت سنجی نشان داد که محدوده دمایی و ضخامتی نقاط ذکر شده در محدوده مجاز قرار دارند. در سطوح خارجی تیوب‌های بخش **Radiation** رسوب زیادی مشاهده شد که احتمالاً در اثر آلودگی هوای محیط و ورود از محل **Air Register** می‌باشد. همچنین نتایج متالوگرافی حاکی از عدم تغییرات میکرو ساختار و عدم شکل‌گیری پدیده خزش بود. همچنین بررسی دمای سطح تیوب‌ها نشان داد تغییرات دمایی در مواضع حساس از دامنه قابل قبول طراحی تجاوز محسوس نکرده است. به طور کلی نتایج بازرسی انجام شده نشان داد شرایط تیوب‌های کوره در وضعیت مطلوبی قرار دارد و آثار پدیده‌هایی نظیر خوردگی ناشی از عناصر سوخت کوره و عناصر موجود در رسوبات تشکیل شده، اکسیداسیون، خزش و تنش گسیختگی در زمان بازرسی مشاهده نگردید.

**کلمات کلیدی:** کوره نم زدایی، پالایش گاز، آزمون‌های غیرمخرب.

### مقدمه

نم زدایی پالایشگاه‌های گاز می‌باشد. وظیفه واحد نم زدایی، جداسازی رطوبت گاز در یافتی از واحد شیرین‌سازی می‌باشد. در صورتی که درصد رطوبت گاز بالا باشد، در بخش سردسازی واحد بازیابی گاز اتان که در درجه حرارت پایین انجام می‌شود، آب یخ زده و منجر به گرفتگی خطوط می‌گردد. بنابراین رطوبت موجود در گاز پس از عبور از بستر جاذب رطوبت، جدا می‌گردد. در هنگام اشباع شدن بسترهای جاذب، ضروری است که آب جذب شده جهت استفاده مجدد از آن‌ها جدا گردد. به همین منظور یک خط لوله گاز پس از عبور از یک کوره تا دمای  $288^{\circ}\text{C}$  گرم می‌شود. سپس این گاز به قسمت پایین برجی که عملیات تخلیه فشار آن انجام شده،

کوره‌ها و هیترها به طور گسترده در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی به منظور افزایش دمای سیال فرایندی مورد استفاده قرار می‌گیرند. کوره‌ها به طور کلی شامل اجزایی همانند محفظه احتراق، نسوز، مشعل، دمپر هوا، تیوب‌ها و دودکش می‌باشند. در محفظه احتراق کوره، فرایند احتراق سوخت انجام می‌گیرد و انرژی حرارتی تولید شده ابتدا از طریق مکانیزم انتقال حرارت جابجایی به لوله‌های افقی هیتر و پس از آن از طریق مکانیزم تشعشع به لوله‌های عمودی قرار گرفته روی دیواره‌ها انتقال می‌یابد و موجب بالا رفتن دمای سیال درون لوله می‌گردد [۱ و ۲]. یکی از موارد کاربرد هیترها در واحد



وارد می‌گردد. در حین عبور گاز احیا کننده، آب موجود در بسترها بخار شده و از بالای آن‌ها خارج می‌شود. عواملی همانند نوع سرویس، کیفیت سوخت، میزان هوای ورودی به مشعل‌ها و رعایت صحیح نسبت سوخت به هوا و جنس مواد استفاده شده در افزایش میزان عمر کوره‌ها و هیترها موثر می‌باشند [۳]. ناخالصی‌های موجود در سوخت مصرفی در اثر احتراق در خاکستر باقی مانده و معمولاً بر روی نقاط داغ موجود در قسمت‌های خارجی لوله‌ها رسوب می‌نمایند. در دمای احتراق، برخی از این ترکیبات به حالت مذاب در می‌آیند و در حضور گازهای حاوی گوگرد، ترکیبات پیچیده‌ای تشکیل می‌دهند [۵ و ۴]. این ترکیبات در برخی موارد یوتکتیک هستند و نقطه ذوب بسیار پایین‌تر از دمای فلز یا آلیاژ دارند و موجب ایجاد فازهای نمک مذاب خورنده و تشدید پدیده خوردگی داغ می‌گردند [۶]. همچنین با گذشت زمان و تجمع رسوبات و دوده‌های ناشی از احتراق ناقص بر روی سطوح لوله‌ها، مقاومت حرارتی افزایش می‌یابد. در این شرایط دما در برخی نقاط لوله به صورت موضعی افزایش یافته و همزمان با چسبندگی رسوبات، تبادل حرارتی کاهش یافته و تغییرات در ریز ساختار تیوب‌ها رخ خواهد داد [۷]. در بیشتر موارد پدیده خزش مکانیزم تخریب شایع در این تجهیزات می‌باشد. عواملی همانند کربوراسیون، اکسیداسیون، سولفیداسیون، فرسایش و چقرمگی پایین نیز می‌توانند منجر به تخریب هیترها گردند [۸].

هر گونه فرایند احتراق شامل خطرات بالقوه‌ای است که مستلزم اقدامات ایمنی مناسبی می‌باشد، بخصوص در مواقعی که سیال داخل تیوب‌ها همانند کوره‌های واحد نم زدایی اشتعال‌زا باشد چرا که احتمال انفجار در این نوع از کوره‌ها افزایش می‌یابد [۹]. بنابراین کنترل عواملی که می‌توانند منجر به تخریب این تجهیزات گردند از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.

نظر به نشستی و آتش سوزی‌های اتفاق افتاده در هیترهای ردیف‌های شیرین‌سازی گازی پالایشگاه‌های سوم و ششم، هدف از این پژوهش بازرسی از کوره واحد نم زدایی گاز به منظور اطمینان از سلامت و صحت عملکرد آن و پیشگیری از عوامل مخرب در تجهیز مذکور تعیین گردید.

## مواد و روش پژوهش

### - روش‌های بازرسی انجام شده

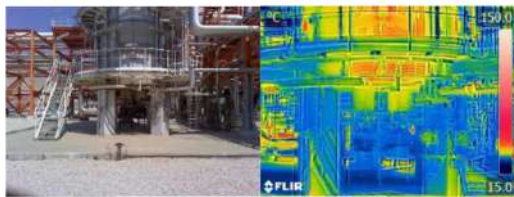
بازرسی‌های به عمل آمده به منظور بررسی وضعیت هیتر در شرایط در حین و خارج از سرویس، انجام پذیرفت. به منظور بررسی توزیع پروفیل دمایی در زمان سرویس، از دو بخش **Convection** و **Radiation** هیتر مربوطه ترموگرافی انجام شد. همچنین مطابق با استاندارد **API573** پس از خارج شدن هیتر از سرویس، اقدامات و آزمون‌های لازم شامل بازرسی چشمی، ضخامت‌سنجی آلتراسونیک، تست هیدرواستاتیک، متالوگرافی در محل (**Replica**) صورت گرفت.

قابل ذکر است جهت بررسی دمای سطح تیوب‌ها، داده‌های مربوط به **TT (Temperature Transmitter)** مورد ارزیابی قرار گرفت.

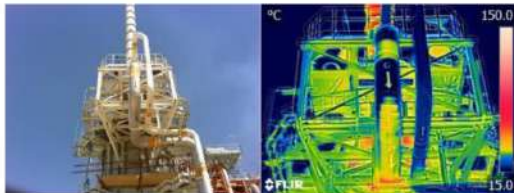
## نتایج

### - ترموگرافی

جهت اطلاع از شرایط عمومی هیتر در زمان سرویس، پیش از خاموشی هیتر واحد نم زدایی، آزمون ترموگرافی انجام گردید. شکل‌های ۱ و ۲ نتایج آزمون ترموگرافی صورت گرفته از هیترهای مورد نظر را نشان می‌دهد. در طی این بررسی‌ها محدوده دمایی خارج از طراحی و بهره‌برداری هیترها مشاهده نگردید و هر دو کوره در زمان بازرسی در دامنه قابل قبول دمایی قرار داشتند.



شکل ۱- تصاویر ترموگرافی در قسمت Radiation.



شکل ۲- تصاویر ترموگرافی تهیه شده در قسمت Convection.

### - بازرسی چشمی قسمت‌های داخلی هیتر

بازرسی چشمی از قسمت‌های مختلف هیتر شامل وضعیت ظاهری تیوب‌ها در قسمت‌های **Radiation** و **Convection**، پخش کننده شعله، نسوز و ساپورت‌ها انجام پذیرفت. در سطوح خارجی تیوب‌های بخش **Radiation** رسوب زیادی مشاهده شد که احتمالاً در اثر آلودگی هوای محیط و ورود از محل **Air Register** می‌باشد (شکل ۳). میزان کم‌انرژی و یا افتادگی تیوب‌ها در اثر خزش احتمالی نیز مورد بازرسی قرار گرفت که انحراف و یا پیچیدگی در طول تیوب‌ها مشاهده نگردید. همچنین مطابق با شکل (۴) در طی بازرسی میدانی شکستگی در محل بازوهای دیفیوزر مشاهده گردید.



شکل ۳- رسوب تشکیل شده در تیوب بخش Radiation.



شکل ۴- وضعیت بازوهای دیفیوزر

## ضخامت‌سنجی آلتراسونیک

پس از انجام تمیز کاری و برسی زنی در محل های مارک شده ضخامت‌سنجی بر روی تیوب‌ها در هر دو بخش **Radiation** و **Convection** انجام پذیرفت. در شکل (۵) و جدول (۱) به ترتیب محل های انجام ضخامت‌سنجی و متریا ل های مربوطه نشان داده شده است. نتایج ضخامت‌سنجی ارائه شده در جدول (۲) نشان می‌دهد که ضخامت تیوب‌ها در محدوده مجاز بوده و تغییر محسوسی مشاهده نمی‌گردد.

جدول ۱- متریا ل تیوب‌ها در بخش **Convection** و **Radiation**.

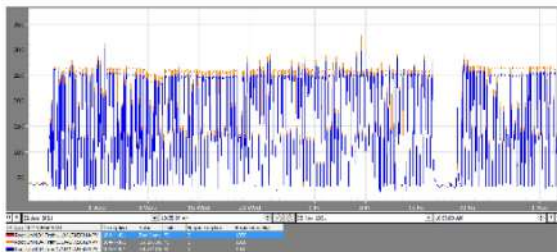
Type	Size	Sch	Material
Tube	4"	80	A 106 Gr.b
Elbow 90	4"	80	A 234 WPB
Elbow 45	4"	80	A 234 WPB
Return	4"	80	A 234 WPB

جدول ۲- نتایج ضخامت‌سنجی UT صورت گرفته در بخش **Radiation** و **Convection**.

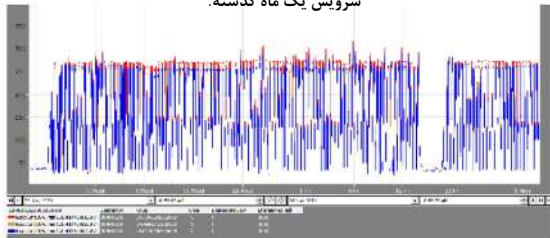
Radiation						
Nominal thk	pipe 06	pipe 12	return in	return ex	pipe 06	pipe 12
8.56	8.9 ~ 9.8	8.5 ~ 9.6	11.9 ~ 12.5	10.8 ~ 11.5	8.9 ~ 9.63	8.6 ~ 9.5
Convection						
Nominal thk	pipe 4"		convection			
8.56	9 ~ 9.4		8.9 ~ 9.63			

## آنالیز داده‌های سطح تیوب‌های کوره

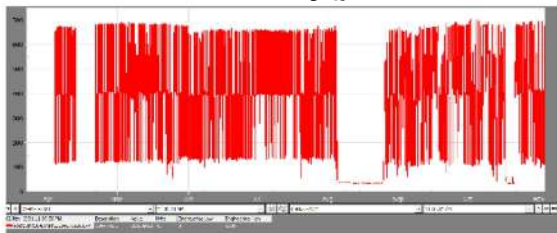
جهت بررسی امکان وقوع پدیده‌هایی نظیر خوردگی داغ و خزش وضعیت تغییرات دمایی در نواحی مختلف هیتر بررسی گردید. شکل‌های (۶ و ۷) تغییرات دمایی سطح تیوب‌های کوره در شیفت‌های مختلف طی یک ماه اخیر را نشان می‌دهند. همانطور که در این دو نمودار مشخص است هیتر تنها در دو شیفت کاری به دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد رسیده است که این محدوده دمایی و دفعات تکرار آن برای وقوع پدیده‌های یاد شده کافی نمی‌باشد. همچنین شکل ۸ تغییرات دمایی در بخش **Convection** کوره را طی سرویس دهی ۷ ماه گذشته نشان می‌دهد این تغییرات دمایی منطبق با دیتاشیت هیتر می‌باشد.



شکل ۶- تغییرات دمایی سطح تیوب‌ها (A) کوره در شیفت‌های مختلف طی سرویس یک ماه گذشته.



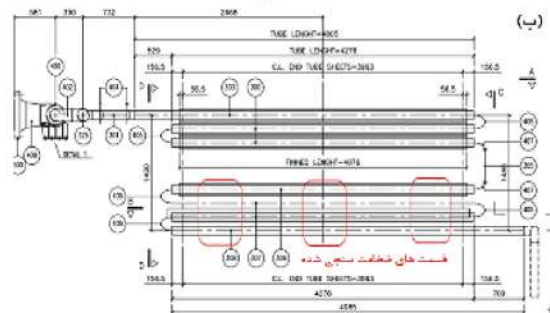
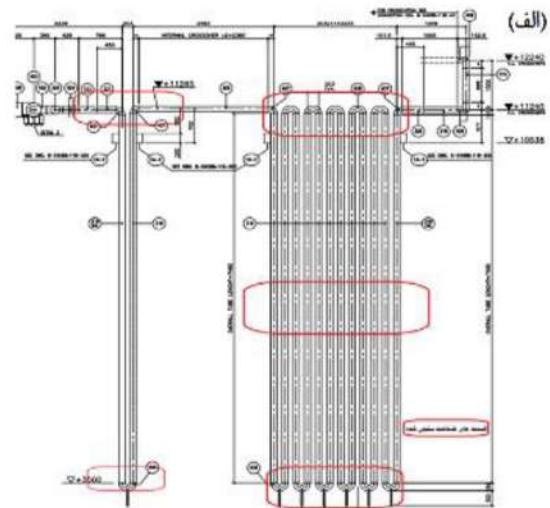
شکل ۷- تغییرات دمایی سطح تیوب‌ها (B) کوره در شیفت‌های مختلف طی سرویس یک ماه گذشته.



شکل ۸- تغییرات دمایی در بخش **Convection** کوره در شیفت‌های مختلف طی سرویس ۷ ماه گذشته.

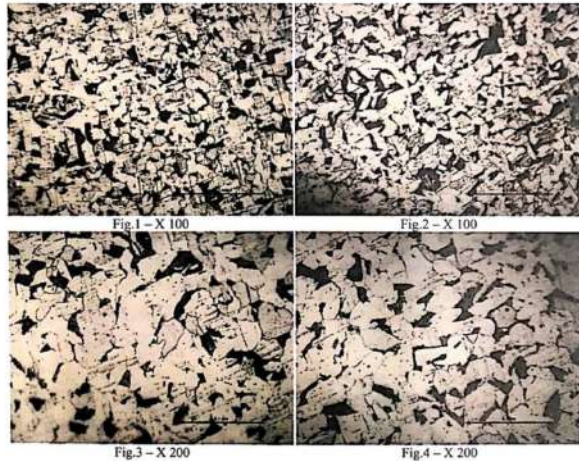
## متالوگرافی Replica

جهت بررسی امکان وقوع پدیده‌هایی نظیر خوردگی داغ و خزش وضعیت تغییرات دمایی در نواحی مختلف هیتر بررسی گردید. مطابق با استاندارد **ASTME3-2017** از محل های تعیین شده نمونه برداری به عمل آمد و پس از آن براساس ملزومات استاندارد **ASTME407-2015** از محلول ۲% نایتال جهت اچ کردن نمونه‌ها استفاده گردید. ریز ساختار نمونه‌ها در شکل (۹ و ۱۰) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشخص است ریز ساختار شامل فاز فریت (روشن) به همراه پرلیت (تیره) می‌باشد که عملیات نرماله کردن در

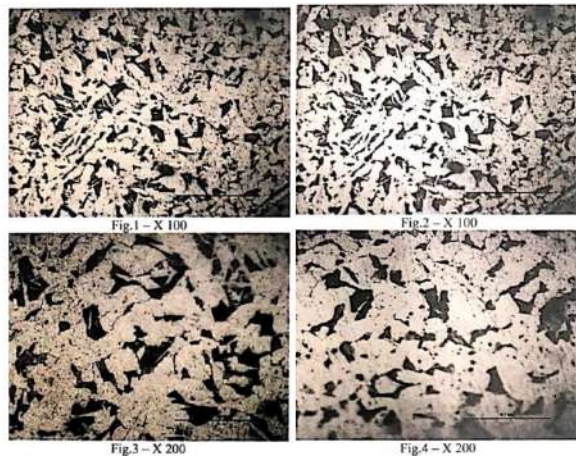


شکل ۵- نواحی مارک شده در بخش الف - **Radiation** و ب - **Convection** جهت انجام ضخامت‌سنجی UT.

این ریز ساختار قابل مشاهده می باشد. با توجه به این که دمای کاری تیوب ها تقریباً در محدوده نرمال می باشد، بنابراین عملیات نرماله شدن در شرایط تحت سرویس صورت نگرفته و مربوط به عملیات حرارتی تیوب مورد آزمایش در مرحله تولید می باشد.



شکل ۹- میکروساختار تیوب در قسمت South-6 O'clock-up



شکل ۱۰- میکروساختار تیوب در ناحیه South-6 O'clock-Down

#### بحث

بروز تخریب های احتمالی در این تجهیز به طور کلی می تواند ناشی از کیفیت سوخت و متریال استفاده شده در تیوب ها باشد که در ادامه به مکانیزم های تخریب محتمل پرداخته خواهد شد.

#### - خوردگی ناشی از عناصر سوخت کوره و عناصر موجود در رسوبات تشکیل شده

عناصر موجود در سوخت کوره همانند گوگرد، کربن و کلر با تشکیل رسوبات بر روی سطح متریال منجر به خوردگی و تخریب می گردند. حضور گوگرد بیش از حد مجاز در سوخت، منجر به پدیده سولفیداسیون در آلیاژهای پایه آهنی در دماهای بالای  $288^{\circ}\text{C}$  می گردد. در دماهای بالا مقدار زیادی از فازهای سولفیدی در آلیاژ و

زیر رسوبات وجود دارند که نهایتاً با شروع اکسیدشدن، سولفیدها تبدیل به فازهای سولفاتی غیر محافظ خواهند شد. فرایند سولفیداسیون به تجمع سولفور بر روی سطح آلیاژ و بعد از آن اکسیداسیون سولفیدها مربوط می شود و اجازه آزاد شدن سولفور و نفوذ بیشتر سولفور را می دهد. بروز پدیده سولفیداسیون در دمای بالا ابتدا توسط واکنش  $\text{H}_2\text{S}$  و ذرات گوگردی به وجود می آید اما با توجه به اینکه  $\text{H}_2\text{S}$  موجود در Fuel Gas در حد مجاز می باشد بروز این پدیده احتمال وقوع کمتری دارد.

تشکیل دوده کربن بر روی سطح فولاد ناشی از احتراق سوخت نیز می توانند منجر به کربوراسیون متریال گردد که در دمای بالا با نفوذ کربن به داخل متریال کاربید تشکیل شده و در اثر تردی حاصله تیوب تخریب می گردد. اما با توجه به اینکه یکی از شروط رخداد این امر بالا بودن درجه حرارت تا حد کافی جهت نفوذ کربن (بالا تر از  $538^{\circ}\text{C}$ ) می باشد، احتمال بروز این مکانیزم تخریب نیز کاهش می یابد اما به جهت کاهش رسوب بیش از حد دوده بر روی تیوب ها باید از افزایش بیش از حد Fuel Gas Flow ممانعت به عمل آید.

#### - پدیده اکسیداسیون

واکنش مولکول اکسیژن موجود در هوا با آلیاژهای مهندسی در دماهای بالا، موجب می شود که در سطح آلیاژها اکسیدهای فلزی تشکیل شده و خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی خود را از دست بدهند. از این رو بروز پدیده اکسیداسیون باعث تخریب و انهدام قطعات به کار رفته در دمای بالا خواهد شد. اکسیداسیون فولادهای ساده کربنی در دماهای بالای  $338^{\circ}\text{C}$  شروع خواهد شد. به طور کلی مقاومت فولادها و سایر آلیاژها در برابر بروز پدیده اکسیداسیون، با افزایش میزان عنصر کروم، افزایش می یابد. با توجه به اینکه متریال تیوب ها A106 Gr.B می باشد که در دسته فولادهای کم آلیاژ قرار گرفته و مقاومت به اکسیداسیون بالاتری نسبت به فولادهای ساده کربنی دارند، بنابراین بروز این مکانیزم تخریب در تیوب های مذکور منتفی می گردد.

#### - پدیده خزش و تنش گسیختگی

در درجه حرارت های بالا (بیش از نصف نقطه ذوب آلیاژ) آلیاژها تحت اعمال تنش های بسیار کم و پایین تر از تنش تسلیم در دراز مدت دچار تغییر شکل دائمی می شوند که به آن پدیده خزش گفته می شود. بروز این پدیده به شدت وابسته به دما و مقدار تنش می باشد. به طور کلی افزایش درجه حرارت و افزایش تنش، می تواند عمر باقیمانده را در حدود ۵۰ درصد و حتی گاهی بیشتر، کاهش دهد. این میزان کاهش بستگی به نوع آلیاژ دارد. دمای آستانه شروع پدیده خزش برای متریال A106 Gr.B برابر با  $343^{\circ}\text{C}$  می باشد. چنانچه دما فراتر از این مقدار برود، خسارات و ترک های خزش به وجود می آیند. اگر چه در موارد ذیل عمر خزشی می تواند از مقیدار پیش بینی شده نیز کم تر باشد.

- نواحی جوش فلزات و آلیاژهای با استحکام بالا

- وجود کاربیدهای خاص در فولاد

- افزایش تنش به علت کم شدن ضخامت (ناشی از خوردگی)

- نواحی جوش فلزات و آلیاژهای با استحکام بالا  
- وجود کاربیدهای خاص در فولاد  
- افزایش تنش به علت کم شدن ضخامت (ناشی از خوردگی)

احتمالی ناشی از کارکرد بیش از عمر مفید نیز حائز اهمیت می باشد.  
نکته بسیار مهم دیگر کنترل دما می باشد به طوری که دما نباید از دامنه دمای طراحی تجاوز کند چرا که افزایش دما منجر تسریع فرایند خوردگی و اکسیداسیون می گردد.

#### منابع

- 1-S. KARAKO and B. D. CAM, "FIRE HEATER ENGINEERING ECONOMICS & DESIGN," Institute of Technology izmir.
- 2-K. Rayaprolu, Boilers: A practical reference. Crc Press, 2012.
- 3-F. Vicente, "Defining The Optimal Life Management Strategy for Gas Heater Tubes," Inspectioning Journal, vol. 19, no. 3, 2013.
- 4-S. Retschitzegger, T. Brunner, and I. Obernberger, "Low-temperature corrosion in biomass boilers fired with chemically untreated wood chips and bark," Energy & fuels, vol. 29, no. 6, pp. 3913-3921, 2015.
- 5-C. A. Duarte, E. Espejo, and J. C. Martinez, "Failure analysis of the wall tubes of a water-tube boiler," Engineering Failure Analysis, vol. 79, pp. 704-713, 2017.
- 6-F. Reinardt, H. Seifert, and H.-J. Gehrman, "Use of low-quality biogenic fuels in a decentralized biomass boiler for thermal energy generation," Energy Procedia, vol. 120, pp. 286-293, 2017.
- 7-J. Purbolaksono, A. Khinani, A. Z. Rashid, A. A. Ali, and N. F. Nordin, "Prediction of oxide scale growth in superheater and reheater tubes," Corrosion science, vol. 51, no. 5, pp. 1022-1029, 2009.
- 8-M. A. Dimastiar, A. Taufik, and A. Z. Syahrial, "Failure Analysis of Tube Radiant Heater Hot Oil in Refinery Industry," in MATEC Web of Conferences, 2019, vol. 269, p. 3013.
- 9-J. Dugué, "Fired equipment safety in the oil & gas industry A review of changes in practices over the last 50 years," Energy Procedia, vol. 120, pp. 2-19, 2017.

#### پی نوشت

- رئیس بازرسی فنی، اداره بازرسی فنی پالایشگاه یازدهم پارس جنوبی
- کارشناس خوردگی، اداره بازرسی فنی پالایشگاه یازدهم پارس جنوبی
- کارشناس ارشد خوردگی، اداره بازرسی فنی پالایشگاه یازدهم پارس جنوبی
- کارشناس مکانیک، اداره بازرسی فنی پالایشگاه یازدهم پارس جنوبی
- کارشناس ارشد بازرسی های غیر مخرب، اداره بازرسی فنی پالایشگاه یازدهم پارس جنوبی

ترک های خزشی در تیوب ها هنگامی رخ می دهند که علاوه بر فاکتور درجه حرارت، مناطق تمرکز تنش نیز وجود داشته باشد. مناطقی همچون اتصالات نازل ها، سه راهی تیوب ها و جوش هایی که دارای عیب هستند، مستعد به بروز این پدیده می باشند. نظر به اینکه بروز پدیده خزش و در پی آن شکل گیری حفره های خزشی در مرز دانه ها و احتمال مشاهده بازشدگی های مرز دانه ها (Fissures) نتایج متالوگرافی نشان داده شده در شکل (۹ و ۱۰) حاکی از عدم وقوع مکانیزم خزش می باشد.

#### نتیجه گیری

نتایج بازرسی و آزمون های صورت گرفته نشان داد در حال حاضر شرایط تیوب های کوره قابل قبول می باشد و آثار پدیده هایی نظیر خوردگی ناشی از عناصر سوخت کوره و عناصر موجود در رسوبات تشکیل شده، اکسیداسیون، خزش و تنش گسیختگی در زمان بازرسی مشاهده نگردید. به طور خلاصه نتایج حاصل از این پژوهش شامل موارد ذیل می باشد:

- براساس ترموگرافی، در زمان انجام تست دمای بحرانی در هیترها مشاهده نشد.
- براساس داده های TT، تغییرات دمایی در مواضع حساس از دامنه قابل قبول طراحی تجاوز محسوسی نکرده است.
- براساس متالوگرافی و بررسی میکروسکوپی تیوب ها، ریزساختار و مورفولوژی در شرایط نرمال می باشد.
- براساس آزمون ضخامت سنجی آلتراسونیک، کاهش ضخامت یکنواخت و یا موضعی مشاهده نشد.
- براساس بازرسی چشمی و از نقطه نظر بازرسی مکانیکال، تجهیز مورد پذیرش می باشد.

-در سطوح خارجی تیوب های بخش **Radiation** رسوب زیادی مشاهده شد که احتمالاً در اثر آلودگی هوای محیط و ورود از محل **Air Register** می باشد.

با توجه به عمر مفید اشاره شده در تیوب های هیتر (۱۰۰۰۰ ساعت)، پایش این موضوع در جلوگیری از حوادث



## آشنایی با الزامات استاندارد 3834 الزامات کیفیتی در جوشکاری ذوبی مواد فلزی - الزامات کیفیتی جامع - قسمت چهارم

مهندس افشین خیام

استفاده کننده نهایی و بهره بردار (end user) این گزارش بازرس جوش است.

**2- اپراتورهای سطح ۲ (NDT)**  
علاوه بر مسئولیت‌هایی که برای اپراتورهای سطح ۱ بر شمرده‌ایم، اپراتورهای سطح ۲ توانایی تفسیر را دارند. یعنی هم حق اجرا و هم تفسیر را دارند. در واقع ما برای اجرای صحیح یک فرایند NDT حداقل اپراتورهای سطح ۲ را نیاز داریم. سطح ۱ که اجرا کند و سطح ۲ که بتواند تفسیر کند. در واقع خروجی‌های گزارش NDT از یک شخص سطح ۲ به دست می‌آید نه سطح ۱. که بهره بردارش هم بازرس جوش است.

الان دیگر در آموزش‌ها و دوره‌هایی که برگزار می‌شود معمولاً سطح ۱ را بطور جداگانه نداریم و سطح ۱ و سطح ۲ را با هم آموزش می‌دهند و باهم گواهینامه صادر می‌کنند. پس در سازمانی که کار NDT انجام می‌دهد حداقل داشتن یک اپراتور سطح ۲ الزامی است. چون باید توانایی تفسیر و ارائه گزارش را داشته باشد.

**3- اپراتورهای سطح ۳ (NDT)**  
یکسری از مسئولیت‌های دیگری هم داریم مثلاً آموزش اپراتورهای سطح ۲ تهیه و تایید دستورالعمل‌ها و روش‌های اجرایی NDT، و مواردی از این قبیل که اینها دیگر برعهده کارشناس سطح ۳ گذاشته می‌شود. نفراتی که گواهینامه سطح ۳ دارند هم تعدادشان محدودتر است و هم واقعاً در هر سازمانی شاید نیاز نباشد کارشناس سطح ۳ داشته باشیم ما می‌توانیم خدماتی که به سطح ۳ بر می‌گردد را از برون سپارها و مشاورها استفاده کنیم. کارشناس سطح ۳ الزامی قطعی که در یک سازمان وجود داشته باشد را ندارد. بسته به اینکه سازمانی کارشناس سطح ۱ و سطح ۲ و سطح ۳ داشته باشد نحوه تایید صلاحیت (Qualify) کردن آن‌ها به این شکل است که آن‌ها

**8- کارکنان بازرسی و آزمایش**

**1-8 کلیات**

**2-8 کارکنان آزمایش غیرمخرب (NDT)**  
کارکنان آزمایش‌های غیرمخرب (NDT) بنا به سطحی که دارند وظایفشان مشخص است. آزمایش‌های غیرمخرب (NDT) خیلی متنوع هستند و معروف‌ترین آن‌ها:

- آزمایش‌های چشمی (VT)،
- آزمایش‌های مایعات نافذ (PT)،
- آزمایش‌های ذرات مغناطیس (MT)،
- آزمایش‌های رادیوگرافی (RT)،
- آزمایش‌های آلتراسونیک (UT).

می‌توانید در هر یک از اینها و یا در تمامی آن‌ها تائید صلاحیت شوید. نکته شفاف و واضحی که در اپراتورهای NDT وجود دارد که استانداردها این افراد را در سه سطح بسته به نوع کاری که می‌کنند و مسئولیتی که به آن‌ها داده می‌شود، تقسیم می‌کنند:

**1- اپراتورهای سطح ۱ (NDT)**

تنها مسئولیتی که به آن‌ها داده می‌شود اجرای فرایند NDT و تهیه گزارش است. گزارشی (Report) که در آن موارد زیر ثبت می‌شود:

الف - چه عیبی (هویت عیب) (Type of Defect): مانند: ترک، مک و تخلخل، بریدگی کنار جوش و ...

ب - محل عیب (Defect Position): محل قرار گرفتن عیب براساس نقطه مبنای مشخص شده، که عیب در آن ناحیه مشاهده شده است.

**پ - ابعاد عیب (Defect Dimensions)**

اپراتور سطح ۱ باید بیان کند من این عیب را با این ابعاد در این موقعیت رویت کردم. این موارد را به بازرس جوش گزارش می‌دهد

دوره‌هایی را می‌گذرانند و هر سطحی، سطح زیر خودش را می‌تواند تایید صلاحیت کند و با توجه به صحبت‌هایی که انجام شد اگر فرایند NDT را برون سپاری نشود و آنرا در سازمان انجام دهند حداقل داشتن یک اپراتور سطح ۲ برای آن فرایند NDT الزامی است. اپراتور باید یک گواهینامه سطح ۲ (NDT) از آن فرایند به ارزیاب نشان دهد که یک نفر سطح III باید آنرا تایید کرده باشد که خودش هم تایید شده از سازمان ASNT باشد و باید قابل ردیابی باشد. آیا اپراتور NDT یک بازرس جوش است؟ آیا این دو شغل یکی هستند؟

خیر این دو شغل یکی نیستند همانطور که بیان شد وظایف اپراتور NDT، یافتن عیب، تعیین هویت عیب، ابعاد و محل عیب است. و باید گزارش را تحویل بازرس جوش دهد. ولی بازرس جوش شخصی است که از گزارش‌ها (Report) استفاده می‌کند و علاوه بر این وظیفه دارد قبل از جوشکاری کنترل‌های لازم را انجام دهد (که ربطی به NDT ندارد) حین جوشکاری ادامه بدهد که بیشتر به کنترل پارامترهای جوشکاری مربوط است. تازه پس از جوشکاری می‌آید از این گزارش‌ها (Report) استفاده می‌کند و آن سوابق قبلی را هم کنار هم قرار می‌دهد و یک تصمیم مهم برای ما خواهد گرفت بازرس جوش و این وظیفه‌ای است که برعهده NDT من نیست برعهده بازرس جوش است. در نهایت مسئول تایید یارد و یا تعمیر این جوش برعهده بازرس فنی جوش شرکت و یا سازمان است و اپراتور NDT در اینجا نقشی ندارد. اما در سازمان‌هایی هم می‌توان دید که این وظایف را برعهده یک نفر گذاشته‌اند که اشکالی ندارد (دو تا شغل را به یک نفر داده‌اند) برای تایید صلاحیت (Qualified کردن) اپراتور NDT داشتن گواهینامه مطابق کاری که انجام می‌دهد که حداقل آن داشتن گواهینامه سطح ۲ (NDT) لازم است و برای VT (اپراتور VT) وجود هیچگونه سابقه و مدرکی الزامی نیست.

و در خصوص بازرسان جوش، استاندارد هیچگونه مدرک تحصیلی و یا گواهینامه دوره کوتاه مدت مثل دوره‌های خیلی معروف بازرسی جوش مانند: CSWIP و CWI و ... را نیاز ندارد اما بازرس جوش به دلیل اهمیتی که دارد، باید از طرف سازمان:

1- شناسایی شده باشد.

2- تایید شده باشد.

یعنی هماهنگ کننده جوش باید یک نفری را پیدا کرده باشد و یک تائیدیه اولیه خودش روی بازرس جوش بدهد (دوره‌ای بفرستد و یا از آن آزمونی بگیرد و خود آن شرکت یک نفر را به عنوان بازرس جوش قبول کرده باشد و تائید کرده باشد) در روز ممیزی ارزیاب شاید با مصاحبه‌های فنی و با چک کردن مدارک این مسئله برایش احراز شود. راجع به حدود پذیرش، عیوب جوش، راجع به نحوه گزارش نویسی، راجع به تصمیم‌گیری‌ها سؤال بپرسد. سوابق را بررسی کند و از افراد راجع به افراد داخلی خط تولید سؤال می‌پرسد.

باید فهمید که این شخص هم توانایی علمی و هم توانایی عملی اجرای فرایندهای بازرسی را دارد یا خیر، به صرف اینکه بازرس

جوش گواهینامه بازرسی دارد یا نه تایید یا رد نمی‌شود و باید کامل فرایند کاری خودش را اجرا کند.

توصیه می‌شود سازمان با یک نامه و یا یک حکم سازمانی این شخص را به عنوان بازرس جوش در خط تولید و یا در سازمان معرفی کرده باشد. هم بحث صلاحیت بازرس مهم است و هم بحث کفایت بازرس مهم است.

در بند ۱۴ استاندارد مطرح می‌شود که بازرس جوش سه تا وظیفه دارد:

1- قبل جوشکاری بازرسی کند.

2- حین جوشکاری بازرسی کند.

3- بعد از جوشکاری بازرسی کند.

وقتی در سازمانی سه تا خط تولید موازی (سه تا سوله) وجود داشته باشد که هر سه خط هم دارند به طور موازی و آنلاین دارند کار می‌کنند قطعاً یک بازرس جوش نمی‌تواند در آن واحد به هر سه خط تولید برسد. این مورد باعث به وجود آمدن عدم تطابق سیستمی تاثیرگذار بر کیفیت می‌باشد. بدون شک این شخص نمی‌رسد که تمام خطوط را به طور دقیق بازرسی کند. حتی با وجود گواهینامه جوشکار و تایید صلاحیتی که به شکل عملیاتی و مکتوب برای شما احراز شده است. باز هم نمی‌توان فکر کرد که کیفیت از جنبه جوشکار مورد خدشه وارد نمی‌شود. در سازمان‌های بزرگ دنیا افراد را بررسی می‌کنند و به سوابق مباحث نجوم و بحث‌هایی که بیشتر در مهندسی صنایع مطرح می‌شود رجوع می‌کنند. که می‌گویند یکسری افراد هستند که در دوره‌هایی (Biorhythmology) از سال دچار اتفاق روانی می‌شوند که عملکرد خودشان را به صورت صد در صد ندارند.

بیوریتمولوژی یکی از ابزارهای مناسب برای شناخت ساختارهای رفتاری انسان است. بیوریتم یکی از تازه‌ترین موضوع‌ها در حیطه شناسایی ارگونومی ذهن است که با شناخت جنبه‌های فکری جسمی و روحی شخص می‌تواند در تقلیل حوادث ناشی از کار و اشتباهات بدون دلیل ظاهری بسیار مؤثر باشد. با شناختن رفتارهای فیزیولوژیک انسان می‌توان آن‌ها را به نحوی برنامه‌ریزی کرد که با حداقل هزینه حداکثر سود به دست آید.

در سازمان‌های بزرگ دنیا می‌آیند این روزها را شناسایی می‌کنند و به کارکنان می‌گویند این روزها سرکار نیابند و با مرخصی تشویقی در خانه بمانند. چون اگر سرکار بیایند ضرری که به سازمان می‌زند از یک روز نیامدنشان خیلی بیشتر است. باید به بازرس علاوه بر مباحث فنی یکسری مباحث روانشناسی را هم اختیار بدهیم. که اگر دید حال جوشکار از لحاظ فکری جسمی و روحی مناسب نیست اختیار آنرا داشته باشد که به آن مرخصی بدهد.

طبق استاندارد ISO 3834-5 استاندارد مورد تایید برای تایید صلاحیت کارکنان NDT استاندارد ISO 9712 معرفی شده است. که در کشور ما این استاندارد کاربرد کمتری دارد و معمولاً از استاندارد ASNT SNT-TC-1A به عنوان استاندارد مرجع برای تایید صلاحیت کارکنان NDT بیشتر استفاده می‌شود.

می‌شود تعیین و تکلیف خواهد شد و در خصوص آن تصمیم‌گیری می‌شود که آیا این افراد و یا این فرد در حوزه بازرسی و NDT مورد تایید هست یا خیر؟ و یا باید ارتقایی در خصوص ایشان صورت بگیرد.

پی‌نوشت

- مدیر تضمین کیفیت شرکت ناظران یکتا

موارد مورد درخواست این بند (بند ۸ استاندارد) شامل گواهینامه سطح ۲ کارکنان NDT است و همچنین در خصوص بازرسان عملکردشان و مصاحبه فنی که به وسیله ممیز انجام می‌شود و همچنین گواهینامه‌ها و سوابق و تجربیات آن‌ها نیز دیده می‌شود. ولی تصمیم نهایی بعد از مصاحبه فنی و ممیزی که از خط تولید



## بررسی و ارزیابی مشکلات ناشی از استفاده تسمه فولادی با کیفیت پایین در استحکام و جوشکاری سازه های فولادی

پژمان روناسی<sup>۱</sup>، حسن غلام موگویی<sup>۲</sup>، علی کرم زاده<sup>۳</sup>، علی صالحی<sup>۴</sup>

### چکیده

به مقطعی فولادی که اختلاف طول و عرض آن زیاد باشد تسمه می گویند. بر اساس کیفیت و اندازه ورق های تسمه کاربردهای گوناگونی دارند. از مشخصه های تسمه ها میتوان به مقاومت، قابلیت جوش پذیری خوب و کاربرد در صنایعی همچون سازه های فلزی اشاره کرد. تسمه های فولادی به روش تولید و در بازار عرضه می شود که شامل تسمه های نوردی، فابریک، ماشینکاری و ترانس می باشند. تولید به روش های ماشینکاری، فابریک و ترانس به دلایل اقتصادی و محدودیت در تولید (نیاز به تجهیزات و هزینه های بالای ماشین کاری)، کمتر مورد توجه تولیدکنندگان و صنعتگران قرار گرفته است. ورق هایی که از این سه روش تولید می شود دارای سطح صاف، صیقلی و در عین حال از کیفیت ساخت بیشتری برخوردارند. رایج ترین و بهینه ترین روش تولید ورق های تسمه، نورد گرم می باشد. این نوع تسمه که به تسمه ذوبی نیز معروف است در کشور ما بیشتر مورد توجه صنعتگران سازه های فلزی قرار گرفته است. در این مقاله به موضوع استفاده از ورق های تسمه، مخصوصاً تسمه های نوردی در سازه های فولادی و مشکلات عدیده آن پرداخته می شود.

**کلمات کلیدی:** تسمه، سازه فولادی، جوشکاری، تورق.

### مقدمه

طبق بازرسی از پروژه های متعدد ساخت سازه های فلزی در سال های اخیر مشاهده گردید، بنا بر دلایلی که به اختصار مکتوب گشته ورق های تسمه جایگزینی برای ورق های فولادی شده اند. از مزایای استفاده از این موارد مصرفی می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- اختلاف قیمت ورق تسمه نسبت به ورق فولادی که مهمترین دلیل می باشد.

- عدم نیاز به دستگاه های برشکاری مانند گیوتین و ... که به تبع آن هزینه خرید تجهیزات کاسته می شود.

- ضایعات کمتر ورق تسمه نسبت به ورق فولادی.

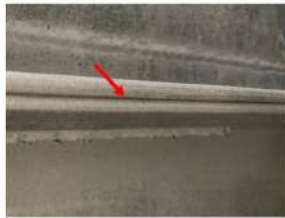
- سهولت در جابجایی و مونتاژ.

- استفاده از ورق تسمه پتانسیل برشکاری را به حداقل می رساند که به تبع آن نیروی کار کمتری مورد نیاز است. با توجه به موارد فوق الذکر، بکارگیری تسمه ها مشکلاتی را به همراه خواهد داشت که در این بررسی به آن خواهیم پرداخت.

### ارزیابی و مشکلات استفاده از تسمه بی کیفیت

عمده دلایل استفاده سازندگان سازه های فلزی از ورق های تسمه، صرفه جویی اقتصادی می باشد. در بسیاری از موارد کارفرما به دلیل

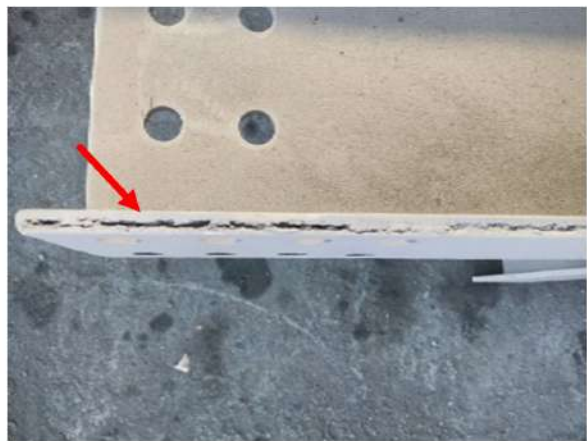




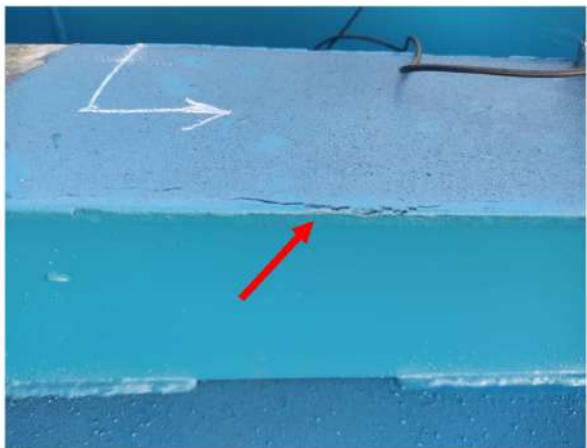
شکل ۲- تسمه معیوب استفاده شده در ساخت قطعه



شکل ۱- تسمه معیوب و دارای ناپیوستگی داخلی



شکل ۳- تسمه با کیفیت پایین دارای ناپیوستگی داخلی



شکل ۴- پارگی و غیریکنواختی در لبه تسمه

### - روش آزمایش

بر روی دو نمونه تسمه فولادی به ضخامت های ۸ و ۱۰ میلی متر با ابعاد ۲۲۵\*۲۶۵ میلی متر آزمون کشش انجام گرفت که با توجه به نتایج به دست آمده در نمونه دارای ضخامت ۱۰ میلی متر که در شکل (۶) نشان داده شده است که نمونه مورد آزمون در بازه مجاز استحکام کششی **UTS فولاد ST37)S235JR:1.0038** قرار ندارد و نهایتاً می تواند با فولاد **ST22** از نظر خواص مکانیکی مطابقت داشته باشد که این مسئله به روشنی بیانگر خواص مکانیکی

صرفه جویی اقتصادی دستور خرید ورق تسمه بجای ورق فولادی را می دهد، همچنین گاهاً شرکت سازنده مغایر نظر کارفرما برای منفعت شخصی ورق تسمه را جایگزین ورق فولادی کرده که خود تخلف بزرگی محسوب می شود.

حال این سؤال پیش می آید، چرا ورق های تسمه نباید جایگزین ورق های فولادی شود؟ همانطور که گفته شد روش های متعددی برای تولید ورق تسمه وجود دارد که رایج ترین روش تولید ورق های تسمه، نورد گرم می باشد. گرچه تسمه نوردها طیف وسیعی را در صنعت سازه های فلزی به خود اختصاص داده ولی استفاده از آن مشکلاتی را به همراه دارد که بخاطر همین مشکلات، مطابق با استاندارد و آئین نامه ها استفاده از آن در سازه های فلزی ممنوع می باشد. برخی از این مشکلات به اختصار عبارت است از:

- نسبت فلزهای به کار رفته در ساخت تسمه یکسان نیست و جنس فلزات به کار رفته نیز با یکدیگر تفاوت دارند، این امر باعث می شود سختی در نقاط مختلف تسمه باهم تفاوت داشته باشد یعنی خواص متالورژیکی و در پی آن خواص مکانیکی دارای گرادیان است که موجب می شود تسمه در نقاط مختلف رفتار یکسانی نداشته باشد. نتیجتاً موجب می شود در ماشینکاری با مشکل مواجه شویم.

- به دلیل نورد گرم که روی این تسمه در مراحل ساخت انجام می شود ناخالصی ها به سمت لبه تسمه هدایت می شوند. تجمع ناخالصی ها در لبه فابریک تسمه در خواص متالورژیکی و مکانیکی تأثیر می گذارد.

- وجود تورق و لمینیشن یکی از مشکلات رایج در این روش تولید می باشد که ناشی از فرایند نورد گرم است.

- در این روش تولیدی لایه های اکسید بر روی تسمه تشکیل می شود. البته که این مشکل فقط از لحاظ ظاهری قطعه را تحت تأثیر قرار می دهد و می توان آن را با سندبلاست از بین برد.

- ایجاد ترک های بسیار ریز در لبه فابریک تسمه های نوردی نیز یکی از مشکلاتی است که باید آن را در نظر گرفت.

- قبل از فرایند نورد گرم، اگر شمش از زمان مشخص بیشتر در کوره بماند باعث می شود که دگر بوره شود یعنی کربن از مرکز شمش به سطح آن نفوذ می کند. اگر این فرایند از حد معینی پیش برود در جوش پذیری، چقرمگی، قابلیت تراشکاری و ... تأثیر خواهد گذاشت که این مشکل یکی از چالش های صنعت فولاد کشورمان نیز می باشد.

- در فرایند نورد گرم، در صورت عدم تنظیم، کنترل و طراحی کالبر قفسه های نورد می تواند باعث ایجاد عیوب زیادی نظیر؛ پوسته شدن، خراش، پیچیدگی، کاناله شدن، تخلخل، تورق و ... در تسمه شود.

- گرید و مشخصات این تسمه ها به آنالیز شمش (یا تختال) نورد شده بستگی دارد. اغلب تولید کنندگانی که شمش مورد نیاز خود را از سایر کارخانه ها تأمین می کنند و فقط پروسه نورد گرم را انجام می دهند، تطابق تسمه با مشخصات درج شده صحیح می باشد. در برخی از موارد دیده شده گرید ثبت شده با آنالیز عنصری و مشخصات تسمه مغایرت دارد که بیشتر تولید کنندگانی هستند که شمش مورد نیاز برای ساخت تسمه را، خود تأمین می کردند.

مثال هایی از تسمه های با کیفیت پایین بکار رفته در ساخت قطعات را در شکل های (۱ تا ۴) نشان داده شده است.

Test No - Date :		Page : 1 OF 4					
Report No. - Date : AF/		Applicator :					
Specimen Type :Plate		Temp: 23±5 ° C					
مشخصه نمونه Specimen	(Phy & Mech.Properties)						
	پهنای Width (mm)	ضخامت Thickness (mm)	طول اولیه L <sub>0</sub> (mm)	کاهش سطح مقطع Reduction of Area (%)	تغییر طول نسبی Elongation (%)	نقطه تسلیم Y.P (N/mm <sup>2</sup> )	حداکثر تنش کششی U.T.S. (N/mm <sup>2</sup> )
No:1 8*240*265 mm	25.30	8.00	80.18	63.1	36.3	282	390
حد استاندارد S235JR(1.0038)	-	-	-	-	≥24	≥235	360-510
Accordance with the request No. - Date :26.04.1400							
<b>Remark :</b> We certify that the statements in this record are correct and that the test coupons were prepared and tested in accordance with the requirements of "EN 10025-2:2019" And the sample <b>Conform</b> to Chemical and Mechanical properties of " S235JR(1.0038)"							
Tested by:		Confirmed by:			Manager of department:		
۱- نتایج فوق صرفاً در مورد نمونه آزمون شده صادق است. ۲- این آزمایشگاه هیچگونه مسئولیتی در مورد تطابق نام و مشخصات نمونه با نتایج ارائه شده ندارد. ۳- این گزارش بدون اجازه کتبی آزمایشگاه نباید تکثیر گردد. مگر بطور کامل و از تمامی آن . ۴- گزارش بدون هوادگرام فاقد اعتبار میباشد.							

شکل ۵- جدول نتیجه آزمون کشش نمونه دارای ضخامت ۸ میلی متر

Test No - Date :		Page : 3 OF 4					
Report No. - Date : AF/		Applicator :					
Specimen Type :Plate		Temp: 23±5 ° C					
مشخصه نمونه Specimen	(Phy & Mech.Properties)						
	پهنای Width (mm)	ضخامت Thickness (mm)	طول اولیه L <sub>0</sub> (mm)	کاهش سطح مقطع Reduction of Area (%)	تغییر طول نسبی Elongation (%)	نقطه تسلیم Y.P (N/mm <sup>2</sup> )	حداکثر تنش کششی U.T.S. (N/mm <sup>2</sup> )
No:2 10*225*265 mm	25.05	10.04	90.03	61.3	37.9	261	315
حد استاندارد S235JR(1.0038)	-	-	-	-	≥24	≥235	360-510
Accordance with the request No. - Date :26.04.1400							
<b>Remark :</b> We certify that the statements in this record are correct and that the test coupons were prepared and tested in accordance with the requirements of "EN 10025-2:2019" And the sample <b>does not conform</b> to Chemical and Mechanical properties of " S235JR(1.0038)"							
Tested by:		Confirmed by:			Manager of department:		
۱- نتایج فوق صرفاً در مورد نمونه آزمون شده صادق است. ۲- این آزمایشگاه هیچگونه مسئولیتی در مورد تطابق نام و مشخصات نمونه با نتایج ارائه شده ندارد. ۳- این گزارش بدون اجازه کتبی آزمایشگاه نباید تکثیر گردد. مگر بطور کامل و از تمامی آن . ۴- گزارش بدون هوادگرام فاقد اعتبار میباشد.							

شکل ۶- جدول نتیجه آزمون کشش نمونه دارای ضخامت ۱۰ میلی متر

و همچنین اضافه شدن لبه فابریک با توجه به کاهش عرض ورق های تولیدی، خطرات ناشی از کاهش کیفیت جوشکاری و تورق در مدت زمان بارگذاری طولانی مشاهده گردد، که بسدین منظور توصیه می شود کارفرمایان پروژه با در نظر گرفتن این موارد اقدام به استفاده از این نوع ورق نمایند.

در نتایج آزمون فراصوتی تسمه های جوشکاری بر حسب تجربه، عیوب و ناپیوستگی های بیشتری از جمله عدم ذوب دیواره نسبت به ورق معمولی مشاهده شده است که یکی از علل این موضوع وجود ناخالصی در ساختار این نوع مواد مصرفی می باشد و تشکیل لایه های اکسیدی در اثر جوشکاری را به همراه دارد.

در اغلب استانداردها قبل از فرایند ساخت، ورق های بالای ضخامت ۲۰ میلی متر برای مطمئن شدن از عدم وجود عیب فرایندی "تورق" باید مورد آزمون فراصوتی با پروپ نرمال قرار گیرند (Lamination check) و پس از تایید صلاحیت مجاز به استفاده خواهند بود اما به دلیل اینکه ضخامت اغلب تسمه هایی که در ساخت مورد استفاده قرار می گیرند، پایین تر از ضخامت گفته شده در استاندارد هستند مورد تست قرار نمی گیرند که در اثر وجود تورق

کمتر از حد انتظار این نوع متریال مصرفی می باشد. همچنین در شکل (۸ و ۷) که مربوط به جدول آنالیز شیمیایی نمونه های مذکور می باشد، همانطور که ذکر شد مشاهده می شود عناصر موجود در نمونه ها دارای تفاوت هایی می باشند که خواص فیزیکی مختلفی را حاصل می شود برای مثال نمونه دارای ضخامت ۱۰ میلی متر درصد سیلیسیم کمتری نسبت به نمونه دارای ضخامت ۸ میلی متر دارد که به روشنی تاثیرات آن بر شکل پذیری و قابلیت ماشینکاری، تشکیل لایه های اکسیدی و کیفیت ظاهری آن نیز دیده می شود و میزان درصد گوگرد و فسفر نیز بر نتایج آزمون کشش بی تاثیر نمی باشند.

### نتیجه گیری

همانطور که در متن مقاله مشاهده گردید ورق های تسمه موجود در بازار گاهها مطابقت لازم با نوع متریال درخواست شده را ندارد، علاوه بر این ممکن است حداقل استحکام و مطابقت آنالیز شیمیایی در این نوع ورق ها وجود داشته ولیکن به دلیل فرایند تولید و تورق شدید در ورق های با ضخامت بالاتر که به صورت چشمی مشهود می باشد

Test No - Date :	Page : 2 OF 4																
Report No. - Date : AF/	Applicator :																
Specimen Type : Plate(No:1,8*240*265 mm)	Temp: 23±5 ° C																
Specimen: 5141 NO.1																	
Ave	Fe 98.9	C 0.0694	Si 0.227	Mn 0.582	P 0.0034 <	S 0.0005	Cr 0.0380	Mo 0.0028									
Ave	Ni 0.0165	Al 0.0324	Co 0.0059	Cu 0.0071 <	Nb 0.0010	Ti 0.0050 <	V 0.0010	W 0.0144									
Ave	Pb 0.0018 <	Sn 0.0005 <	B 0.0001	Zr 0.0010	Ca 0.0043	Bi 0.0057 <	Ta 0.0040 <	Se 0.0010									
Ave	Zn < 0.0001																
مستند سازی	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Al	Co	Ni	Nb	Ti	V	B	N	Fe
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Remark : We certify that the statements in this record are correct and that the test coupons were prepared and tested in accordance with the requirements of " ASTM E 415: 2017"																	
Accordance with the request No. - Date :26.04.1400																	
Tested by:				Confirmed by:				Manager of department:									
<p>۱- نتایج فوق صرفاً در مورد نمونه آزمون شده صادق است.</p> <p>۲- این آزمایشگاه هیچگونه مسئولیتی در مورد تطابق نام و مشخصات نمونه با نتایج ارائه شده ندارد.</p> <p>۳- این گزارش بدون اجازه کتبی آزمایشگاه نباید تکثیر گردد. مگر بطور کامل و از تماس آن .</p> <p>۴- گزارش بدون هوادگرام فاقد اعتبار میباشد.</p>																	

شکل ۷- جدول آنالیز شیمیایی نمونه دارای ضخامت ۸ میلی متر

Test No - Date :	Page : 4 OF 4																
Report No. - Date : AF/	Applicator :																
Specimen Type : Plate(No:2,10*225*265 mm)	Temp: 23±5 ° C																
Specimen: 5141 NO.2																	
Ave	Fe 99.0	C 0.108	Si 0.150	Mn 0.539	P 0.0025	S 0.0006	Cr 0.0409	Mo 0.0020									
Ave	Ni 0.0177	Al 0.0291	Co 0.0064	Cu 0.0074	Nb 0.0016	Ti 0.0080 <	V 0.0010	W 0.0218									
Ave	Pb 0.0033 <	Sn 0.0005 <	B 0.0001	Zr 0.0022	Ca 0.0012	Bi 0.0055 <	Ta 0.0040 <	Se 0.0010									
Ave	Zn < 0.0001																
مستند سازی	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Al	Co	Ni	Nb	Ti	V	B	N	Fe
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Remark : We certify that the statements in this record are correct and that the test coupons were prepared and tested in accordance with the requirements of " ASTM E 415: 2017"																	
Accordance with the request No. - Date :26.04.1400																	
Tested by:				Confirmed by:				Manager of department:									
<p>۱- نتایج فوق صرفاً در مورد نمونه آزمون شده صادق است.</p> <p>۲- این آزمایشگاه هیچگونه مسئولیتی در مورد تطابق نام و مشخصات نمونه با نتایج ارائه شده ندارد.</p> <p>۳- این گزارش بدون اجازه کتبی آزمایشگاه نباید تکثیر گردد. مگر بطور کامل و از تماس آن .</p> <p>۴- گزارش بدون هوادگرام فاقد اعتبار میباشد.</p>																	

شکل ۸- جدول آنالیز شیمیایی نمونه دارای ضخامت ۱۰ میلی متر

منابع  
 1-Article-2-ASME Sec V, SECTION V. ASME BPVC.V-2019. 2019ASME Boiler and. Pressure Vessel Code. An International Code - Supplemental Personnel Qualification Requirements for NDE.QSA Global, MAN-027 -880 Series Source

در هنگام تست خط جوش، دستگاه عیب یاب فراصوتی ممکن است در تشخیص محل قرار گیری عیوب دچار خطا شود که در این صورت آزمون غیر مخرب به نتایج صحیح و قابل اعتمادی نخواهد



September 2017].  
4-J. R. Lamarsh, Introduction to Nuclear Engineering, 3rd edition ed., Upper Saddle River, New ersey: Prentice Hall, 2001.

پی نوشت

- 1- کارشناس ارشد متالورژی
- 2- دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد
- 3- دانشجوی کارشناسی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد
- 4- کارشناس ارشد متالورژی شرکت آزمون فولاد

Rojector, vol. November 2014 Release, Burlington, MA: QSA Global, Inc., 2012.

2-U.S. Nuclear Regulatory Commission, "NRC Regulations Title 10, Code of Federal Regulations," 29 August 2017. [Online][Accessed 20 September 2017].

3-U.S. Nuclear Regulatory Commission, "NRC Regulations Title 10, Code of Federal Regulations," 29 September 2017. [Online]. [Accessed 20

# اتصال غیر مشابه Ti-6Al-4V به فولاد زنگ نزن 316L با یک فرایند اتصال جدید مبتنی بر ساخت افزایشی قوس الکتریکی ترکیب شده با جوشکاری قوس الکتریکی دو سیمی (قسمت اول)

مهندس کاظم بابایی

## چکیده

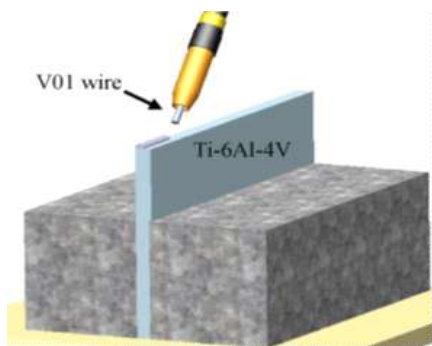
ساختار اتصال فولاد زنگ نزن Ti-6Al-4V به 316L در بسیاری از زمینه‌ها تقاضاهای بالقوه‌ای دارد. با این حال، جلوگیری از تشکیل ترکیبات بین فلزی (IMCs) جوش بین فولاد زنگ نزن Ti-6Al-4V به 316L بسیار دشوار است، که به شدت خواص اتصال را کاهش می‌دهد. در این مقاله، یک فن‌آوری اتصال جدید که ترکیبی از جوشکاری قوسی سیمی و جوشکاری قوسی دو سیمه ترکیبی است برای اتصال فولاد زنگ نزن Ti-6Al-4V و 316L استفاده شده است. توزیع ذرات کروم و خوشه‌های (V)S<sub>2</sub>S در ماتریس در فصل مشترک Cu/V به تقویت پراکندگی و تقویت محلول جامد رابط کمک می‌کند. استحکام کششی 394 مگاپاسکال با کشیدگی 2/53 درصد به دست آمد. اتصال به ترتیب در رابط Cu/V جوش قوس الکتریکی تک سیم و ناحیه Cu جوش قوس سیم دوقلو ترکیب شده به صورت فضایی شکسته شد. حالت‌های شکست پلاستیک گودی در اتصالات شناسایی شد. این فناوری نه تنها برای اتصالات فلزی غیر مشابه آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V/فولاد زنگ نزن 316L قابل استفاده است، بلکه یک استراتژی تحقیقاتی جدید برای اتصال بین سایر فلزات غیر مشابه ارائه می‌دهد.

## مقدمه

سازه‌های فلزی غیر همسان می‌توانند از مزایای عملکرد هر فلز استفاده کامل کنند و حداکثر مزیت و سود اقتصادی را به دست آورند. بنابراین، آنها طیف گسترده‌ای از کاربردهای بالقوه در صنایع هوافضا، هسته‌ای، میکرو الکترونیک و صنایع شیمیایی دارند. به ویژه، تقاضای گسترده‌ای برای سازه‌های فلزی غیر مشابه ساخته شده از آلیاژ تیتانیوم و فولاد زنگ نزن وجود دارد، زیرا آنها مقاومت در برابر خوردگی عالی و خواص مکانیکی بالا را با هزینه نسبتاً کمتر ارائه می‌دهند. با این حال، به دلیل ناسازگاری متالورژیکی و تفاوت در خواص فیزیکی حرارتی این دو نوع آلیاژ، دستیابی به اتصال آلیاژ تیتانیوم و فولاد زنگ نزن بسیار دشوار است. به طور خاص، عنصر Ti از آلیاژ تیتانیوم و عنصر آهن از فولاد زنگ نزن می‌توانند به راحتی ترکیبات بین فلزی شکننده (IMC) مانند TiFe<sub>2</sub> و TiFe را تشکیل دهند که باعث ایجاد ترک در اتصال غیر مشابه تیتانیوم / فولاد زنگ نزن می‌شود. علاوه بر این، تفاوت زیاد در خواص فیزیکی

حرارتی دو نوع آلیاژ منجر به تنش‌های پسماند بالا و پیچیدگی بیش از حد در ساختار اتصال می‌شود. IMCها و تنش‌های پسماند در نهایت عملکرد مکانیکی اتصال را کاهش می‌دهند و کاربردهای آن را محدود می‌کنند. از این رو، فناوری اتصال با راندمان و کیفیت بالا برای آلیاژ تیتانیوم و فولاد زنگ نزن مورد توجه تحقیقات قرار گرفته است. در حال حاضر، لحیم کاری یک روش اتصال اولیه فلزات غیر مشابه تیتانیوم/فولاد است. فلزات پرکننده لحیم کاری مانند CuNi<sub>10</sub>، 2Ag-28Cu، Ti<sub>57</sub>Zr<sub>13</sub>Cu<sub>21</sub>Ni<sub>9</sub>، Ag<sub>70</sub>، 5Cu<sub>27</sub> با منابع حرارتی مختلف گرم شده و لایه‌های میانی مختلفی را تشکیل دادند که می‌تواند به اندازه کافی واکنش بین Ti و Fe را تحت تأثیر قرار دهند. با این حال، برخی از عناصر از فلزات پرکننده می‌توانند با Fe یا Ti واکنش دهند و IMCهای دیگر را تشکیل دهند. تاشی و همکاران از لحیم کاری خلاء برای اتصال Ti-6Al-4V و فولاد زنگ نزن با استفاده از فلز پرکننده AgCuZn استفاده کردند. با افزایش دمای لحیم کاری و زمان اتصال، مقدار IMCهای عمدتاً

اتصال فلزی غیر مشابه برای آلیاژ تیتانیوم و فولاد زنگ نزن ایجاد کردیم. این فناوری جوشکاری، قوس الکتریکی پشت تک سیمی را بر اساس فناوری ساخت افزایشی با جوشکاری قوسی دو سیمه ترکیبی برای پر کردن پاس جوش ترکیب می کند. سیم آلیاژی وانادیوم (V01) و سیم آلیاژ مس (S214) به عنوان سیم پرکننده استفاده شد. ریزساختار، توزیع عناصر سطحی و خواص مکانیکی اتصال جوش داده شده Ti-6Al-4V/316L مورد مطالعه قرار گرفت و مکانیسم اتصال این دو فلز به طور مفصل در بخش های بعدی توضیح داده خواهد شد. روش جوشکاری قوسی پشت تک سیمی شامل سه مرحله بود. ابتدا، بر اساس فناوری ساخت افزایشی نشان داده شده در شکل (۱)، سیم جوش V01 مورد استفاده برای تهیه لایه جداسازی V ذوب شد و با استفاده از جوشکاری انتقال فلز سرد (CMT) روی صفحه انتهایی صفحه آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V رسوب کرد.



متشکل از CuTi و Fe-Cu-Ti افزایش یافت که باعث کاهش مقاومت برشی اتصال شد. جوشکاری حالت جامد مانند جوشکاری اصطکاکی، جوشکاری انتشاری، جوشکاری انفجاری و جوشکاری اولتراسونیک نیز به طور گسترده برای اتصال فلزات غیر مشابه استفاده می شود که می تواند به میزان قابل توجهی مقدار IMC های شکننده را کاهش دهد. سونگ و همکارانش اتصالات پیوند نفوذی Ti/a-b Ti/Nb/Cu/SS از آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V و فولاد زنگ نزن AISI316L را با اتصالات پیوند نفوذی با استفاده از چند لایه Cu/Nb به دست آوردند. با این حال، اندازه، شکل و انواع سازه های جوشی غیر مشابه به دلیل ویژگی های جوشکاری حالت جامد محدود شده اند. شرایط خاص جوشکاری، مانند فشار و خلأ، ساخت ساختار هندسی پیچیده و دستیابی به بهره وری جوشکاری بالا را بسیار دشوار می کند.

در مقایسه، به دلیل انعطاف پذیری جوش خوب و راندمان بالا، جوشکاری ذوبی مانند جوشکاری با پرتو لیزر جوشکاری با پرتو الکترونی و جوشکاری قوس الکتریکی اغلب برای اتصال آلیاژ تیتانیوم و فولاد زنگ نزن استفاده می شود.

متأسفانه، اگر جوشکاری ذوبی مستقیم بدون مواد پرکننده اعمال شود، عناصر Fe و Ti به سرعت در حوضچه مذاب مخلوط شده و واکنش نشان می دهند. بنابراین، مواد پرکننده جوشکاری مانند لایه های میانی، سیم های جوشکاری و پودر های آلیاژی برای ساخت لایه های جداسازی استفاده شد که می تواند به طور موثر دو فلز پایه را جدا کرده و از تشکیل IMC های Ti-Fe جلوگیری کند.

به منظور از بین بردن تأثیر IMC ها و دستیابی به اتصال فلزات غیر مشابه صفحات ضخیم با راندمان و کیفیت بالا، ما یک فرایند

## ریز ساختار و رفتار الکتروشیمیایی اتصال غیر مشابه فولادهای DP 980 و MC 500 S در محیط های حاوی یون کلرید

توحید رجبی<sup>۱</sup>، مسعود عطاپور<sup>۲</sup>

### چکیده

روش جوشکاری مقاومتی نقطه ای یکی از روش های رایج در صنایع خودروسازی می باشد. از این رو در این مقاله دو آلیاژ DP 980 و MC 500 S به روش جوش نقطه ای مقاومتی متصل شده و رفتار خوردگی این اتصال غیر مشابه جهت کاربرد در صنایع خودروسازی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. بررسی های ریزساختاری فلزات پایه و نقطه جوش به کمک میکروسکوپ نوری انجام شده است. همچنین به منظور بررسی سختی در اثر تغییرات ریزساختاری، آزمون ریزسختی سنجی انجام شده است. ارزیابی رفتار خوردگی فلزات پایه و نقطه جوش با استفاده از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی در دو محیط  $\text{NaOH M} + \text{NaCl M } 0/1$  و  $\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ M } 0/1 + \text{NaCl M } 0/1$  انجام شده است.

نتایج بررسی های الکتروشیمیایی در محیط اسیدی حاوی یون کلرید بیانگر پایداری شیمیایی پایین تمامی نمونه های مورد آزمایش بود. در حالی که نمونه های مورد آزمایش رفتار به مراتب بهتری را در محیط بازی حاوی یون کلرید به دلیل تشکیل لایه رویین از خود نشان دادند. در این بین به فولاد S500MC بهترین رفتار خوردگی و نقطه جوش آلیاژ DP 980 بدترین رفتار خوردگی را بدلیل تفاوت های ریزساختاری از خود نشان دادند.

**کلمات کلیدی:** خوردگی، ریزساختار، خودرو، جوشکاری مقاومتی نقطه ای، ریزسختی سنجی، پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی.

### مقدمه

در سال های اخیر فولاد های دوفازی با توجه به استحکام بالا و خواص شکل دهی مناسب مورد توجه صنایع خودروسازی قرار گرفته است. این دسته از فولاد ها شامل زمینه ی فریتی و جزایر مارتنزیتی در ریزساختار هستند که از ترکیب دو فاز نرم (فریت) و سخت (مارتنزیت)، خواص مکانیکی ویژه در این دسته از فولاد ها بوجود می آید [۱]. در این بین، فولاد دوفازی DP 980 به عنوان یکی از آلیاژ های رایج در صنایع خودرو سازی شناخته می شود. از طرفی فولاد کم آلیاژ با استحکام بالا S500MC به دلیل استحکام بالا، چقرمگی مناسب، وزن پایین و شکل پذیری در معرض توجه صنایع خودروسازی قرار دارند [۲]. هر دو آلیاژ S500MC و DP 980 با توجه خواص مکانیکی مناسب در شاسی خودرو ها مورد استفاده قرار می گیرند.

در صنایع مختلف به منظور دست یابی به شکل و یا ساخت یک

مجموعه، اتصال غیر هم جنس از طریق فرایندهای مختلف جوشکاری از جمله جوشکاری نقطه ای مقاومتی، جوشکاری قوسی لیزری و جوشکاری اصطکاکی، که در این میان، روش جوشکاری نقطه ای مقاومتی در اتصالات مربوط به شاسی خودرو جایگاه ویژه ای دارد [۳]. اما بدلیل تغییرات ریزساختاری بوجود آمده در ورق های در معرض جوش، رفتار خوردگی مناطق ریزساختاری مختلف شامل منطقه متأثر از حرارت (HAZ)، ناحیه دکمه جوش (FZ) و فلز پایه تغییر می کند [۴]. از طرفی اتصالات غیر هم جنس در فلزات باعث تشکیل سلول گالوانیک شده که از این رو فرایند خوردگی تشدید می شود [۵]. بنابراین بررسی و ارزیابی رفتار خوردگی اتصالات موجود در صنایع خودرو سازی با توجه به حضور یون خورنده کلر در محیط بواسطه حضور گل و لای در محیط و باران های اسیدی، حائز اهمیت می باشد. پیشوا و همکاران [۶] با بررسی رفتار خوردگی اتصال فولاد IF به روش جوش نقطه ای مقاومتی به این نتیجه رسید که هر دو نمونه فولاد پایه و نقطه جوش در محیط بازی  $\text{NaCl M } 0/1 + \text{NaOH M } 0/1$  رفتار به مراتب بهتری را نسبت به اسیدی  $\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ M } 0/1 + \text{NaCl M } 0/1$  از خود نشان می دهند. سرکار و همکاران [۷] با بررسی رفتار خوردگی فولاد های دوفازی DP در محیط حاوی کلرید نشان دادند که افزایش فاز مارتنزیت در ریزساختار این دسته از فولاد ها منجر به تشدید خوردگی شده و از این رو ریزساختار مواد تأثیر بسزایی در رفتار خوردگی دارند.

خوردگی در صنایع خودرو سازی تأثیرات مخربی داشته و بررسی رفتار خوردگی و عوامل تأثیرگذار در تشدید این فرایند از اهمیت بالایی برخوردار می باشد. با توجه به لزوم بررسی رفتار خوردگی آلیاژها و اتصالات مورد استفاده در صنایع خودرو سازی و نبود اطلاعات کافی در این زمینه، در این مقاله رفتار خوردگی و ریزساختار اتصال غیر هم جنس دو آلیاژ S500MC و DP 980 با استفاده از روش جوشکاری مقاومتی، در دو محیط اسیدی و بازی حاوی یون کلرید مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

### مواد و روش پژوهش

در این مقاله دو آلیاژ S500MC و DP 980 با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول (۱) با استفاده از روش جوشکاری نقطه ای مقاومتی با استفاده از دستگاه Pedestal و با شرایط مشخص شده در جدول (۲)، متصل شده است. به منظور بررسی ریزساختاری فولادهای پایه و نقطه ای جوش، از میکروسکوپ نوری MELJI

می باشد. این موضوع بدلیل وجود فاز مارتنزیتی و عیوب کریستالی در فولاد های دوفازی است که منجر به افزایش مقاومت الکتریکی در این دسته از آلیاژ های می شود. در قسمت **FZ** مربوط به فولاد **DP 980**، دمای بالای ایجاد شده حین فرایند جوشکاری و کاهش دما با نرخ بالا و همچنین ضخامت پایین نمونه های مورد بررسی در این پژوهش، فرصت استحاله و یا تغییر فاز وجود نداشته و ساختار به صورت مارتنزیتی درشت می باشد. همچنین در قسمت **FZ** مربوط به فولاد **S 500MC** بدلیل سرعت بالای کاهش دما از فاز آستنیت، بواسطه الکترودهی های مسی آبرگرد، فاز مارتنزیت مشاهده می شود. با توجه به تفاوت های ریزساختاری دو آلیاژ **S 500MC** و **DP 980**، فاز مارتنزیت با سهولت بیشتری در آلیاژ دوفازی **DP 980** تشکیل می شود که این منجر به این موضوع می شود که مارتنزیت تشکیل شده در این آلیاژ درشت تر از آلیاژ **S 500MC** باشد.

ناحیه **HAZ** در هر دو آلیاژ متشکل از سه ناحیه متأثر از حرارت بالای بحرانی، متأثر از حرارت میان بحرانی و متأثر از حرارت زیر بحرانی می باشد. ناحیه متأثر از حرارت بالای بحرانی بدلیل نزدیکی به دکمه جوش، دما به بالای **AC3** در نمودار آهن کربن افزایش یافته و از این رو این ناحیه به منطقه تک فاز آستنیت وارد می شود. در نهایت بدلیل نرخ بالای سرمایش ناشی از الکترودهی آبرگرد مسی، ریزساختار در ناحیه متأثر از حرارت بالای بحرانی به مارتنزیت تبدیل می شود. اما در ناحیه ی متأثر از حرارت میان بحرانی حداکثر دمای تجربه شده مابین **AC1** و **AC3** بوده و از این رو ریزساختار دو فلز پایه به فریت و آستنیت تبدیل می شود. بواسطه جدایش عناصر کربن و منگنز، سختی پذیری در این ناحیه از فلز پایه بیشتر شده و با سرمایش به فاز بینیت، مارتنزیت، فریت و پرلیت تبدیل می شود.

در ناحیه متأثر از حرارت زیر بحرانی حداکثر دمای تجربه شده کمتر از **AC1** بوده که این موضوع منجر به بازبخت مارتنزیت موجود در ریزساختار فولاد دوفازی **DP 980** می شود [9]. اما آلیاژ **S 500MC** در این ناحیه با افزایش دما و کاهش سریع دما ریزساختاری به صورت فریتی و مارتنزیتی دارد. وجود فاز فریت در میان مارتنزیت ظریف در آلیاژ **S 500MC** در ناحیه متأثر از حرارت زیر بحرانی با توجه به دور بودن این ناحیه از دکمه جوش و ریزساختار این آلیاژ قابل توجیه می باشد.

## ریزسختی سنجی

پروفیل سختی ناحیه ی اتصال غیر مشابه دو آلیاژ **S 500MC** و **DP 980** به همراه شماتیک ناحیه مورد بررسی در آزمون ریزسختی سنجی در شکل (۴) ارائه شده است.

با توجه به تفاوت ریزساختاری در نواحی مختلف شامل ناحیه **HAZ** و فلزات پایه، سختی در نواحی مختلف اتصال متفاوت است.

مطابق با بررسی های متالوگرافی انجام شده، ناحیه ی اتصال شامل فاز مارتنزیتی خشن و درشت بوده و در منطقه **HAZ** با افزایش فاصله از دکمه جوش، درصد فاز مارتنزیت کاهش می یابد. از طرفی

مجهز به دوربین **Digi Retina 16** استفاده شده و ریزساختار تمامی نمونه ها با استفاده از محلول اچانت نایتال ۲ درصد مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی ریزساختار نقطه جوش، مقطع عرضی این نقطه با استفاده از وایرکات بریده شده و پس از فرایند اچ، از نواحی **HAZ** و **FZ** تصویر برداری شده است. نمونه های مورد بررسی ریزساختاری با استفاده از رزین اپوکسی مانع شده پس از انجام فرایند آماده سازی متالوگرافی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین به منظور اندازه گیری فازی نمونه های مورد آزمایش از نرم افزار **Image J** استفاده شده است. آزمون ریزسختی سنجی از نمونه مطابق با شکل (۱) و بوسیله دستگاه ریزسختی سنجی **Buehler Micromet** انجام شده است. آزمون های الکتروشیمیایی در دو محیط  $\text{NaClM0/1}$  و  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{M0/1}$  و  $\text{NaClM0/1} + \text{NaClM0/1}$  در دو محیط **Na OHM0/1** در دمای اتاق ( $25^\circ\text{C}$ ) به کمک دستگاه گالوانواستات **IVIUMStat XRe** انجام شده است. آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی پس از غوطه وری در شرایط مدار باز در محیط های مذکور به مدت یک ساعت انجام شده است. به منظور ارزیابی رفتار خوردگی از سلول خوردگی سه الکترودی شامل الکتروده مرجع **Ag/AgCl**، الکتروده مقابل پلاتینی و نمونه های مورد آزمایش به عنوان الکتروده کاری انجام شده و به منظور افزایش دقت در مطالعات، هر آزمون سه بار تکرار شده است. آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک از پتانسیل  $-250\text{ mV}$  نسبت به پتانسیل مدارباز شروع و در  $1/5\text{V}$  نسبت به الکتروده مرجع با نرخ روبش  $0.32\text{ mVs}^{-1}$  به پایان رسیده است.

## نتایج و بحث

### بررسی های ریز ساختاری

ریزساختار دو آلیاژ **S 500MC** و **DP 980** در شکل (۲) ارائه شده است. فولاد دوفازی **DP 980** از دو فاز فریتی و مارتنزیتی تشکیل شده که در تصاویر ریزساختاری به ترتیب با رنگ های سفید و مشکی قابل مشاهده هستند (شکل ۱-الف). آنالیز تصویری از فولاد دوفازی **DP 980** بیان گر ۴۳ درصد حجمی فاز مارتنزیت و ۵۷ درصد فاز فریت می باشد. اما ریز ساختار فولاد کم آلیاژ با استحکام بالا **S 500MC** به صورت تک فاز و شامل فاز فریت بوده و مرز دانه های فریت به وضوح در تصویر قابل مشاهده می باشد (شکل ۱-ب).

شکل (۳) ریزساختار مقطع عرضی از ناحیه ی اتصال دو آلیاژ **S 500MC** و **DP 980** را نشان می دهد. در تصاویر نوری گرفته شده از مقطع عرضی ناحیه جوش، سه ناحیه **HAZ**، **FZ** و فلزات پایه به وضوح قابل مشاهده هستند. ریزساختار محل اتصال دو آلیاژ **S 500MC** و **DP 980** به دلیل تشکیل مذاب و سرعت سرمایش بالا در حین فرایند جوشکاری تغییر کرده بطوری که در ناحیه اتصال، دانه بندی فصل مشترک دو آلیاژ به صورت ستونی و در خلاف جهت انتقال حرارت رشد کرده است. بدلیل نرخ انجمادی بیشتر آلیاژ **S 500MC** نسبت به آلیاژ **DP 980**، خط پایان انجماد در فصل مشترک قرار نگرفته و متمایل به سمت فولاد **DP 980**



کند. فولاد های دوفازی به دلیل وجود فاز مارتنزیتی در ریزساختار، مقاومت پایینی در برابر خوردگی دارند. این موضع بدلیل تشکیل میکرو کوپل های گالوانیک در فصل مشترک فریت و مارتنزیت می باشد که منجر به انحلال موضعی می شود [۱۱]. اما نواحی جوش دو آلیاژ S 500MC و DP 980 بدلیل حضور فاز مارتنزیتی و انرژی بالای ناشی از حرارت و سرمایش، رفتار خوردگی ضعیف تری را نسبت به فلزات پایه از خود نشان می دهند. در بین دو فلز جوش، آلیاژ S 500MC رفتار خوردگی مناسبتری را نسبت به آلیاژ 980 DP از خود نشان می دهد. در ناحیه ی رویین منحنی پلاریزاسیون آلیاژ جوش DP 980 نواساناتی دیده می شود که بیانگر تشکیل حفرات شبه پایدار بوده و نشان دهنده عدم پایداری شیمیایی این نمونه در محیط مورد آزمایش می باشد.

## نتیجه گیری

در بررسی های ریزساختاری مشخص شد که آلیاژ S 500MC ساختاری فریتی داشته در حالی که فولاد DP 980 دارای ساختار دوفازی فریتی و مارتنزیتی می باشد. همچنین در ناحیه جوش ساختار به صورت کاملاً مارتنزیتی بوده و با افزایش فاصله از دکمه جوش، کسر حجمی فاز مارتنزیت در ساختار ناحیه متاثر از حرارت کاهش می یابد. از این رو بیشترین میزان سختی در دکمه جوش و کمترین میزان سختی مربوط به فولاد S 500MC می باشد. بررسی های الکتروشیمیایی در محیط اسیدی حاوی یون کلرید بیانگر پایداری شیمیایی پایین تمامی نمونه های مورد آزمایش بود. در حالی که تمامی نمونه ها رفتار به مراتب بهتری را در محیط بازی حاوی یون کلرید به دلیل تشکیل لایه رویین از خود نشان دادند. در این بین به فولاد S 500MC بهترین رفتار خوردگی و نقطه جوش آلیاژ DP 980 بدترین رفتار خوردگی را بدلیل تفاوت های ریزساختاری از خود نشان دادند.

## منابع

- 1-C. Ma, D. L. Chen, S. D. Bhole, G. Boudreau, A. Lee, and E. Biro, "Microstructure and fracture characteristics of spot-welded DP600 steel," Mater. Sci. Eng. A, vol. 485, no. 1-2, pp. 334-346, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.msea.2007.08.010.
- 2-N. A. Rybkin, I. G. Rodionova, N. G. Shaposhnikov, V. V. Kuznetsov, and P. A. Mishnev, "Development of approaches for selecting the optimum alloying systems and production parameters for manufacturing hot-rolled high-strength low-alloy steels for automobile building," Metallurgist, vol. 53, no. 7-8, pp. 486-494, Jul. 2009, doi: 10.1007/s11015-009-9186-4.
- 3-S. Salimi Beni, M. Atapour, M. R. Salmani, and R. Ashiri, "Resistance Spot Welding Metallurgy of Thin Sheets of Zinc-Coated Interstitial-Free Steel," Metall. Mater. Trans. A, vol. 50, no. 5, pp. 2218-2234, May 2019, doi: 10.1007/s11661-019-05146-8.
- 4-G. R. Mirshekari, E. Tavakoli, M. Atapour, and B. Sadeghian, "Microstructure and corrosion

فلزات پایه آلیاژ S 500MC و DP 980 به ترتیب فریتی و فریتی به همراه جزایر مارتنزیتی می باشد که سختی به مراتب کمتری را نسبت به نقطه اتصال از خود نشان می دهند. از این رو دکمه جوش با میزان سختی نسبت به سایر نواحی در پروفیل سختی مشاهده می شود که میانگین این مقدار HVN 449 محاسبه شده است. ناحیه HAZ با توجه به تصاویر متالوگرافی، با توجه به فاصله از دکمه جوش، تحت تاثیر میزان حرارت دریافتی مختلفی بوده و از این رو شامل سه بخش با ریزساختار های متفاوت می باشد. بنابراین میزان سختی در این ناحیه متغیر می باشد. با نزدیک شدن به دکمه جوش با توجه به افزایش کسر حجمی فاز مارتنزیت، میزان سختی نیز افزایش می یابد. بطور کلی آلیاژ دوفازی DP 980 با توجه به وجود جزایر مارتنزیتی در ریزساختار و تمایل ذاتی این آلیاژ برای تشکیل مارتنزیت در اثر ایجاد حرارت و نرخ سرمایش بالا، میزان سختی بیشتری را نسبت به آلیاژ S 500MC در تمامی نقاط شامل فلز پایه، ناحیه FZ و HAZ، از خود نشان می دهد.

## مشخصه یابی الکتروشیمیایی

### - بررسی پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی

شکل (۵) منحنی های پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی دو آلیاژ S 500MC و DP 980 به همراه دکمه جوش از هر دو سمت، در دو محیط  $\text{NaOH M} + \text{NaCl M} 0/1$  و  $\text{H}_2\text{SO}_4 \text{M} 0/1 + \text{NaCl M} 0/1$  را نشان می دهد. مطابق با شکل (۵-الف)، تمامی نمونه های مورد آزمایش در محیط اسیدی  $\text{NaCl M} 0/1 + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{M} 0/1$  مقاومت پایینی در برابر خوردگی داشته و فرایند خوردگی یکنواخت با نرخ بالا اتفاق می افتد. در بین تمامی نمونه ها، آلیاژ S 500MC رفتار خوردگی نسبی بهتری را نسبت به DP 980 و نقاط جوش از خود نشان می دهد که این موضوع بدلیل تفاوت های ریزساختاری این آلیاژ می باشد. اما در مجموع رفتار خوردگی بین دو آلیاژ S 500MC و DP 980 به همراه دکمه جوش از هر دو سمت نزدیک به یکدیگر می باشد. اما رفتار خوردگی دو آلیاژ S 500MC و DP 980 به همراه دکمه جوش از هر دو سمت در محیط بازی  $\text{NaOH M} + \text{NaCl M} 0/1$  کاملاً متفاوت از محیط اسیدی  $\text{NaCl M} 0/1 + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{M} 0/1$  می باشد (شکل ۵-ب). در منحنی های پلاریزاسیون تمامی نمونه های مورد بررسی، ناحیه رویین مشاهده می شود که حاکی از تغییر مکانیزم خوردگی نمونه های مورد بررسی در این محیط است. فلزات پایه S 500MC و DP 980 به دلیل پیچیدگی پایین تر شبکه کریستالی رفتار خوردگی به مراتب بهتری را نسبت به دکمه جوش از خود نشان می دهند. از طرفی، فاز مارتنزیت پایداری کمتری را نسبت به فاز فریت در فرایند خوردگی از خود نشان می دهد. همچنین بررسی ناحیه رویین می تواند اطلاعات مفیدی در مورد سینتیک خوردگی مواد ارائه دهد [۱۰]. مطابق با منحنی های پلاریزاسیون، آلیاژ S 500MC در رنج وسیع تری نسبت به فولاد دوفازی DP 980 از سطح فلز به واسطه تشکیل لایه رویین محافظت می

10.3390/ma11112310.

9-I. Hajiannia, M. Shamanian, M. Atapour, E. Ghassemali, and N. Saedi, "Development of Ultrahigh Strength TRIP Steel Containing High Volume Fraction of Martensite and Study of the Microstructure and Tensile Behavior," *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 71, no. 6, pp. 1363-1370, Jun. 2018, doi: 10.1007/s12666-017-1271-y.

10-S. Sahu, O. J. Swanson, T. Li, A. Y. Gerard, J. R. Scully, and G. S. Frankel, "Localized Corrosion Behavior of Non-Equiatomic NiFeCrMnCo Multi-Principal Element Alloys," *Electrochim. Acta*, vol. 354, p. 136749, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.electacta.2020.136749.

11-H. Chen, Z. Lv, L. Lu, Y. Huang, and X. Li, "Correlation of micro-galvanic corrosion behavior with corrosion rate in the initial corrosion process of dual phase steel," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 15, pp. 3310-3320, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.09.123.

### پی نوشت

- 1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده ی مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان  
2- دانشیار، دانشکده ی مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

behavior of multipass gas tungsten arc welded 304L stainless steel." *Mater. Des.*, vol. 55, pp. 905-911, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.10.064.

5-C. Liu, D. L. Chen, S. Bhole, X. Cao, and M. Jahazi, "Polishing-assisted galvanic corrosion in the dissimilar friction stir welded joint of AZ31 magnesium alloy to 2024 aluminum alloy," *Mater. Charact.*, vol. 60, no. 5, pp. 370-376, May 2009, doi: 10.1016/j.matchar.2008.10.009.

6-P. Pishva, S. S. Beni, M. Atapour, M. R. Salmani, and R. Ashiri, "Study of Corrosion Behavior in Resistance Spot Welds of Thin Sheets of Zinc-Coated Interstitial-Free Steel," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 30, no. 3, pp. 1723-1736, Mar. 2021, doi: 10.1007/s11665-021-05474-0.

7-P. P. Sarkar, P. Kumar, M. K. Manna, and P. C. Chakraborti, "Microstructural influence on the electrochemical corrosion behaviour of dual-phase steels in 3.5% NaCl solution," *Mater. Lett.*, vol. 59, no. 19-20, pp.2488-2491, Aug. 2005, doi: 10.1016/j.matlet.2005.03.030.

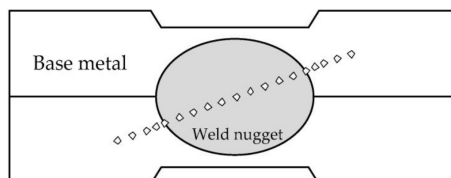
8-X. Zhang, F. Yao, Z. Ren, and H. Yu, "Effect of Welding Current on Weld Formation, Microstructure, and Mechanical Properties in Resistance Spot Welding of CR590T/340Y Galvanized Dual Phase Steel," *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 11, p. 2310, Nov. 2018, doi:

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فلزات پایه (درصد وزنی).

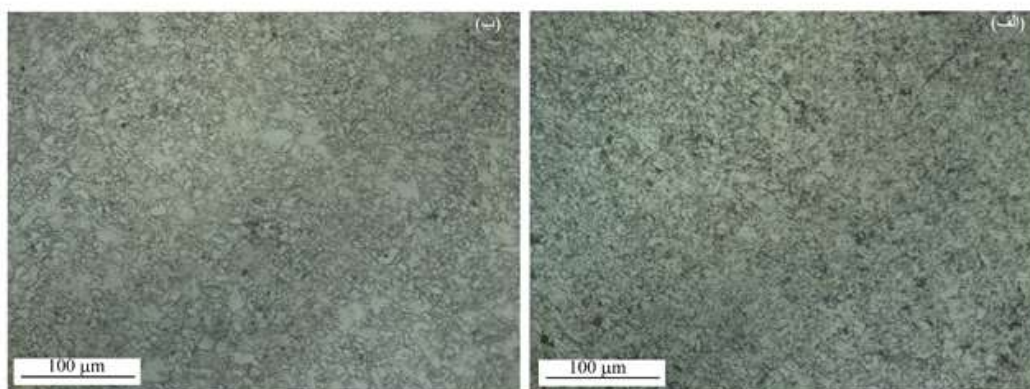
	Fe	Al	S	P	Mn	Si	C
پایه		۰/۰۰۲	۰/۰۱۷	۰/۰۹۷	۱/۵۰۸	۰/۰۹۴	۰/۰۷۵
پایه		-	۰/۰۰۱	۰/۰۰۹	۲/۴۵۰	۰/۱۰۵	۰/۰۷۴

جدول ۲- پارامتر های جوشکاری نقطه ای مقاومتی.

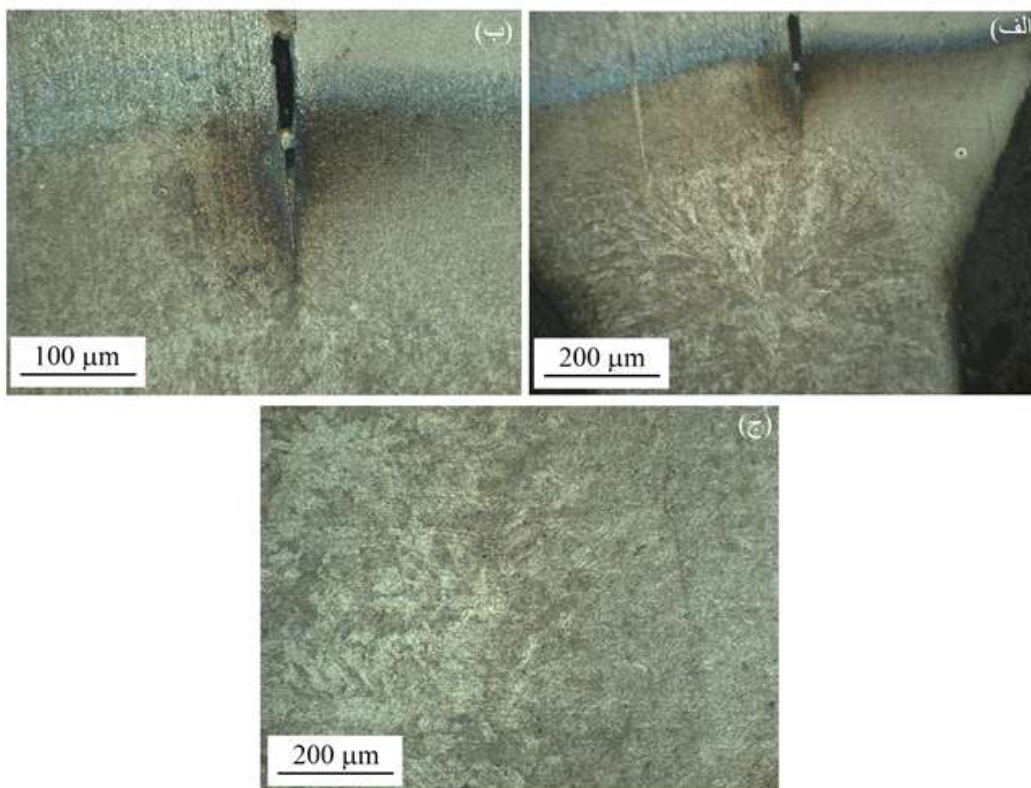
جریان جوشکاری (I)	زمان جوشکاری (Cycle)	نیروی الکتروود (KN)	قطر دکمه ی جوش (mm)
۱۳	۱۱/۵	۵/۱۶	۶/۸۵



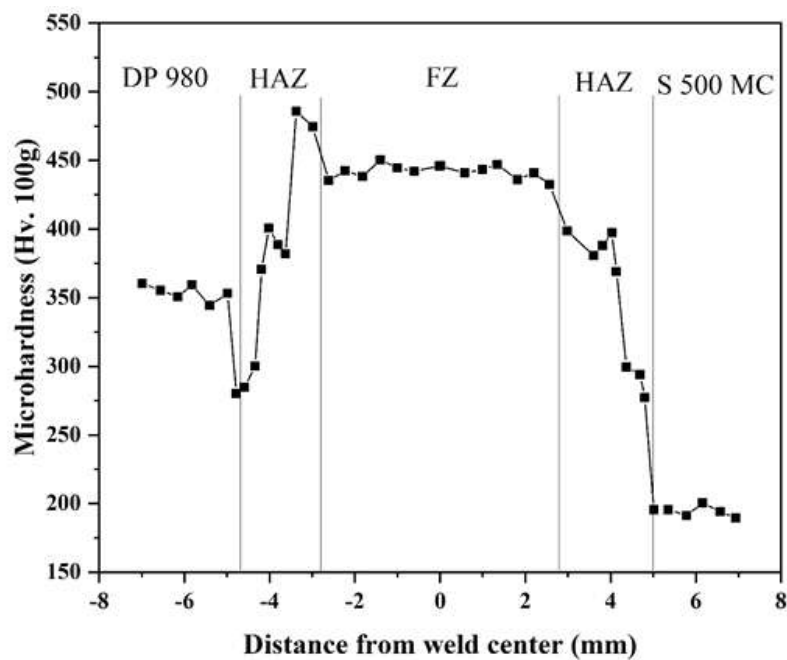
شکل ۱- شماتیک محل انجام آزمون ریزسختی سنجی [۸].



شکل ۲- تصاویر ریزساختار آلیاژ های الف - DP 980 و ب - S 500 MC.

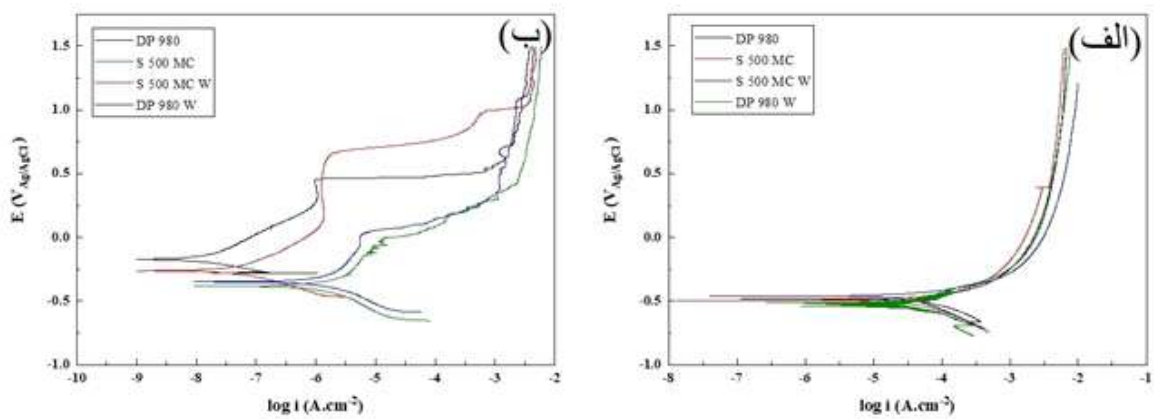


شکل ۳- ریزساختار الف- ناحیه ی جوش در بزرگنمایی پایین، ب- ناحیه ی HAZ و ج- ناحیه ی FZ.



شکل ۴- پروفیل ریزسختی دو آلیاژ DP 980 و S 500 MC.

# Welding Research



شکل ۵- منحنی های پلاریزاسیون در محیط های الف- اسیدی و ب- بازی حاوی یون کلرید.

## میکرو ساختار و خواص مکانیکی منطقه جوش در اتصال فولاد هوا ناپذیر Corten A به فولاد ساده کربنی St12 به روش جوشکاری قوس فلز با گاز محافظ دی اکسید کربن

مهرداد وطن دوست<sup>۱</sup>، احسان محمدی زهرانی<sup>۲</sup>، بهروز بیدختی<sup>۳</sup>، علی داودی<sup>۴</sup>

### چکیده

به دلیل استفاده از اتصال هم جنس فولاد هوا ناپذیر Corten A و اتصال غیر همجنس فولاد هوا ناپذیر Corten A با فولاد ساده کربنی St12 در صنعت، میکروساختار و خواص مکانیکی اتصالات در منطقه جوش مورد ارزیابی قرار گرفت. برای اتصال دهی از روش جوشکاری قوس فلز با گاز محافظ دی اکسید کربن که در صنعت مورد استفاده قرار می گیرد استفاده شد. فرایند جوشکاری شامل کنترل جریان و ولتاژ، نرخ تزریق سیم جوش، نرخ گاز محافظ، سرعت جوشکاری، پیکربندی اتصالات و میکرو ساختار بود. خواص مکانیکی و ریزساختار و کیفیت کلی منطقه جوش به وسیله آزمون های کشش، خمش، سختی سنجی، متالوگرافی و رادیوگرافی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ریزساختار منطقه جوش در اتصالات هم جنس و غیر همجنس شامل فریت مرز دانه ای، فریت سوزنی و فریت ویدمن اشتاتن است. استحکام کششی اتصال هم جنس 497 مگاپاسکال و اتصال غیر همجنس 303 مگاپاسکال اندازه گیری شد. سختی منطقه جوش در اتصال هم جنس 210 ویکرز و در اتصال غیر همجنس 180 ویکرز بود. در مجموع اتصال هم جنس از نظر استحکام و سختی منطقه جوش نسبت به اتصال غیر همجنس برتری دارد.

**کلمات کلیدی:** فولاد هوا ناپذیر، جوشکاری، سختی، خواص مکانیکی، میکرو ساختار.

### مقدمه

فولادهای هوا ناپذیر فولادهایی هستند که مقاومت به خوردگی اتمسفری بالایی دارند که این مقاومت بالا به خوردگی اتمسفری به دلیل تشکیل یک لایه اکسید محافظ بر روی سطح این فولادها است. فولاد Corten نیز یکی از انواع فولادهای هوا ناپذیر است که در ساخت پل ها، ریل ها، ساختمان ها، کشتی ها، کانتینر های دریایی، مخازن مخلوط کن سیمان و ... کاربرد دارد. فولاد Corten طول عمر بسیار بالایی دارد که این طول عمر بالا به این دلیل وجود عناصر آلیاژی مانند مس و کروم است تا بتواند سرعت خوردگی اتمسفری را کاهش دهد. به دلیل داشتن سرعت خوردگی بسیار پایین و تشکیل لایه اکسید محافظ بر روی فولاد Corten این فولادها معمولاً بدون اینکه رنگ شود یا محافظت خاصی بر روی آن صورت گیرد در محیط مورد استفاده قرار می گیرد و با توجه به شرایط محیطی که در آن قرار می گیرند می توانند دارای طول عمر بین 4 تا 8 برابر نسبت به

فولادهای ساده کربنی داشته باشند. فولادهای Corten بسته به شرایط تولید و ضخامتی که تولید می شوند دارای گریدهای مختلفی هستند. ورق های فولادی Corten A دارای ضخامت کمتر از 12 میلی متر هستند و به روش نورد گرم تولید می شوند. [1-3] برای اتصال و جوشکاری ورق فولاد Corten A معمولاً از روش های قوسی با گاز محافظ مانند GMAW و یا GTAW استفاده می شود. طریقه اتصال معمولاً سربه سر یا لب به لب است. سعی بر این است که میزان کربن معادل در فولاد Corten تا حد ممکن پایین نگه داشته شود تا برای جوشکاری و اتصال مشکلی وجود نداشته باشد. فیلر مناسب برای جوشکاری ورق فولادی Corten A فیلر ER70S-6 است که از این فیلر با قطر های 1/8، 1/4 و 3/8 میلی متر برای جوشکاری ورق های Corten A مورد استفاده قرار می گیرد. قطر فیلر متغیر بسیار مهمی است چرا که بر اساس اندازه قطر فیلر میزان جریان، ولتاژ و سرعت حرکت الکتروود تنگستن را برای جوشکاری ورق ها انتخاب می شود که این متغیرها میزان حرارت ورودی را در جوشکاری مشخص می کنند. از گاز آرگون یا کربن دی اکسید یا مخلوط هردو گاز برای گاز محافظ در روش های قوسی برای جوشکاری و اتصال ورق فولادی Corten A مورد استفاده قرار می گیرد. [1، 4]

یکی از کاربردهای مهم ورق های فولادی Corten A استفاده از آن ها در مناطق ساحلی و یا سیستم های تصفیه فاضلاب است. این محیط ها به شدت خورنده هستند اما ورق های فولادی Corten A در این محیط ها می توانند مقاومت به خوردگی خوبی را داشته باشند. [4، 5]

در کشورهای توسعه یافته تقریباً بیش از نیمی از جمعیت و کارخانه های بزرگ صنعتی در کنار دریاها، سواحل و مناطقی که دسترسی آسانی به آب دارند زندگی می کنند. به دلیل وجود رطوبت بالا و نمک های دریایی مانند NaCl در این مناطق سرعت خوردگی و تخریب سازه های فلزی در این مناطق بسیار بالا است و همچنین به دلیل وجود آلاینده هایی مانند SOx در مناطق شهری و صنعتی سرعت تخریب سازه ها بیشتر می شود. برای حل این مشکل در این مناطق باید از فلزاتی مقاوم تر در برابر خوردگی اتمسفری برای ساخت سازه های فلزی استفاده کرد که در ابتدا از فولادهای زنگ نزن به جای فولادهای ساختمانی و فولادهای ساده کربنی برای ساخت سازه ها استفاده می شد اما گران بودن فولادهای زنگ نزن و میزان تولید کم آن ها یک مانع اساسی برای ساخت سازه های فلزی بود. این نیاز منجر به ساخت و تولید فولادهای مقاوم به خوردگی اتمسفری

Multi mig 1611 بود و از سیم جوش ER70S-6 با قطر 0/8 میلی متر به صورت کلاف برای اتصال ورق ها به یکدیگر مورد استفاده قرار گرفت. روش جوشکاری به صورت نیمه خودکار به این صورت که فلز مصرفی به صورت خودکار و با سرعت ۵ متر بر دقیقه از نازل خارج می شود. گاز محافظ در این فرایند گاز CO<sub>2</sub> مورد استفاده قرار گرفت. انتخاب روش GMAW به دلیل پایداری بالاتر قوس و بازدهی بالاتر فرایند جوشکاری نسبت به فرایند GTAW بوده است. حرارت ورودی میانگین در اتصال هم جنس Corten برابر با ۷/۱۶۵۶ ژول بر سانتی متر و حرارت ورودی میانگین در اتصال غیر هم جنس Corten برابر با ۱۸۴۹/۶ ژول بر سانتی متر بوده است. [۴-۱]

## - فیلم رادیوگرافی

از فیلم های رادیوگرافی Kodak AA400 برای بررسی اتصال بعد از فرایند جوشکاری مورد استفاده قرار گرفت. نتایج فیلم های رادیوگرافی نوع عیوب جوشکاری، محصل عیوب و اندازه آن ها را به خوبی نشان می دهد. پرتو ایکس تابشی با توان ۱۷۰ کیلوولت بر فیلم ها تابیده شد و مدت زمانی که فیلم ها در معرض پرتو بوده اند ۶ ثانیه بوده است.

## - میکروسکوپ نوری

برای بررسی های ریزساختاری منطقه جوش و منطقه متأثر از جوش HAZ بعد از سنباده زنی نمونه اتصال با سنباده های ۱۰۰، ۲۴۰، ۳۲۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰ و ۲۰۰۰ نمونه را بر روی نمد با خمیر الماسه پولیش می کنیم تا سطح نمونه کاملاً صاف و صیقلی شود. سپس نمونه به مدت ۵ ثانیه در محلول نایتال ۲ درصد غوطه ور شد تا ریزساختار نمونه نمایان شود. پس از نمایان شدن ریزساختار نمونه در زیر میکروسکوپ نوری قرار داده می شود و ریزساختار نمونه مورد بررسی قرار می گیرد.

## - سختی سنجی

برای بررسی سختی ریزساختار در منطقه جوش، متأثر از جوش HAZ و فلز پایه از دستگاه سختی سنج ... استفاده شد تا پروفیل سختی اتصال از فلز پایه تا منطقه جوش نمایان شود. آزمایش انجام شده در محدوده دامنه گواهی نامه استاندارد ISO/IEC17025 قرار دارد و در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و رطوبت ۳۰ درصدی انجام شده است. استاندارد مرجع آزمون ASTM E 384-17 است.

## - تست کشش و تست خمش

برای بررسی استحکام جوش از دستگاه ... برای تست های کشش و خمش مورد استفاده قرار گرفت. در آزمون PQR که مطابق با استاندارد ASME BPVC IX برای اتصالات طراحی شده است از هر اتصال در مناطق مشخص شده باید ۲ عدد تست کشش، ۲ عدد تست خمش ریشه و ۲ عدد تست خمش گرده گرفته شود. تست

(فولادهای هوا ناپذیر) شد که در ابتدا تنها برای ساخت مجسمه ها در مناطق ساحلی مورد استفاده قرار می گرفت اما بعداً در ساخت پل ها و ساختمان ها مورد استفاده قرار گرفت. [۵-۸]

ورق های فولادی Cor-ten A علی رغم داشتن مقاومت به خوردگی بالا هنگامی که جوشکاری می شوند رفتار خوردگی و خواص مکانیکی آن ها تغییر می کند. در اتصالات هم جنس و غیر هم جنس ورق های فولادی Cor-ten A ترکیب شیمیایی قسمت های جوشکاری شده با ترکیب شیمیایی باقی سازه یکسان نیست که در این مناطق ممکن است خوردگی موضعی مانند خوردگی حفره ای یا شیاری رخ دهد. در اتصالات غیر هم جنس با فولادهای کربنی ساده مانند فولاد St12 که ریزساختاری مشابه با فولادهای هوا ناپذیر دارد میزان خوردگی موضعی مانند خوردگی شیاری و حفره ای به میزان کمتری مشاهده می شود. [۶]

در این پژوهش هدف اتصال ورق های فولادی Cor-ten A به صورت هم جنس با یکدیگر و اتصال ورق های فولادی Cor-ten A با ورق های فولاد ساده کربنی St12 به صورت غیر هم جنس با استفاده از روش جوشکاری قوسی با گاز محافظ است. فیلر ER70S-6 برای اتصال دهی به صورت هم جنس و غیر هم جنس ورق فولادی Cor-ten A مورد استفاده قرار می گیرد. برای بررسی کیفیت اتصال از منطقه جوشکاری شده ورق ها تست رادیوگرافی گرفته خواهد شد تا عیوب موجود در جوشکاری مشخص شود. برای بررسی خواص مکانیکی از منطقه جوش و مناطق نزدیک به آن و فلز پایه تست میکرو سختی گرفته خواهد شد. همچنین نمونه های خواص مکانیکی مطابق با استاندارد ASME BPVC IX از محل اتصال برش داده می شوند به طوری که قسمت جوشکاری شده در وسط نمونه قرار گرفته باشد تا خواص مکانیکی اتصال مورد بررسی قرار بگیرد. همچنین سختی سنجی از منطقه اتصال صورت می گیرد تا پروفیل سختی از فلز پایه تا منطقه جوش برای اتصال به دست آید [۹-۱۱].

## مواد و روش پژوهش

### - مواد اولیه و آماده سازی نمونه ها

در این پژوهش از فولاد هوا ناپذیر Corten A و فولاد ساده کربنی St12 برای بررسی اتصالات هم جنس و غیر هم جنس فولادهای هوا ناپذیر استفاده شد. ترکیب شیمیایی فولاد Corten A و St12 که از آزمون ICP-OES به دست آمده است در جدول (۱) مشاهده می شود.

برای اتصال ورق های فولادی Corten A به صورت هم جنس و غیر هم جنس ورق ها با ابعاد ۱۵×۴۵ برش داده شدند. سپس بعد از انجام تمیز کاری شیمیایی بر روی سطح قطعات ورق ها به گیره بسته می شوند و در حالت 3G به یکدیگر متصل می شوند. جوشکاری و اتصال ورق های فولادی به روش GMAW صورت می گیرد. پارامترهای جوشکاری اتصال ها در جدول (۲) مشاهده می شود. دستگاه مورد استفاده در این فرایند اتصال دهی دستگاه

## - خواص مکانیکی

نتایج حاصل از تست‌های کشش نشان داد که استحکام اتصال هم‌جنس بیشتر از استحکام اتصال غیرهمجنس است. شکست نمونه‌های کشش در اتصال غیرهمجنس یک‌بار در منطقه فلز پایه **Corten** و دیگری در منطقه **HAZ** رخ داده است که شکست در منطقه فلز پایه به صورت برشی با زاویه ۴۵ درجه رخ داده اما در منطقه **HAZ** شکست به صورت کاملاً ترد رخ داده است. استحکام کششی شکست در اتصال هم‌جنس برابر با ۴۹۷ مگا پاسکال اندازه‌گیری شد. شکست نمونه‌های کشش در اتصال غیرهمجنس در منطقه فلز پایه **St12** بوده‌اند و هر دو شکست به صورت برشی و با زاویه ۴۵ درجه بوده‌اند. استحکام کششی شکست در اتصال غیرهمجنس برابر با ۳۰۳ مگا پاسکال اندازه‌گیری شد. تصاویر نمونه‌های خواص مکانیکی اتصال هم‌جنس فولاد **Corten A** در شکل (۶) و اتصال غیرهمجنس فولاد **Corten A** در شکل (۷) مشاهده می‌شود.

## - سختی نتایج

حاصل از سختی سنجی نشان داد که سختی فولاد ساده کربنی **St12** از سختی فولاد هوا ناپذیر **Corten A** کمتر است که دلیل این اختلاف در سختی این فولادها ناشی از وجود عناصر آلیاژی همچون کروم و مس در فولاد هوا ناپذیر **Corten A** است. همچنین سختی در منطقه جوش و منطقه متأثر از جوش در اتصال هم‌جنس **Corten A** بالاتر از اتصال غیرهمجنس **Corten A** به **St12** بود. وجود عناصر آلیاژی در فولاد هوا ناپذیر **Corten A** باعث به وجود آمدن کاربیدهای آلیاژی در مردانه‌ها شده است و فازهای غیرتعادلی همچون فریت سوزنی و ساختار ویدمانشتاتن به وجود آمده است. همچنین عدد اندازه دانه در اتصال هم‌جنس بزرگ‌تر از اتصال غیرهمجنس بود که باعث شده ریزساختار در اتصال هم‌جنس ریزدانه‌تر از اتصال غیرهمجنس باشد به همین دلیل سختی اتصال هم‌جنس بیشتر از اتصال غیرهمجنس است. نتایج حاصل از سختی سنجی در شکل ۸ بر حسب سختی ویکرز گزارش شده است.

## نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

- در اتصال فولادهای هوا ناپذیر با روش‌های قوسی با گاز محافظ اتصالات هم‌جنس مقاومت و استحکام بالاتری را دارند اما اتصالات غیرهمجنس با فولادهای ساده کربنی علی‌رغم داشتن مقاومت و استحکام پایین‌تر، این فولادها ارزان‌تر هستند و برای کاهش هزینه‌های تولید استفاده از اتصالات غیرهمجنس در مکان‌هایی که کمتر در معرض خوردگی اتمسفری قرار دارند ضروری است.  
- در تفسیر فیلم‌های رادیوگرافی تعداد و پراکندگی عیوب جوشکاری مانند آخال‌های کروی در اتصالات هم‌جنس کمتر از اتصال غیرهمجنس است که به دلیل وجود ترکیب شیمیایی مشابه و ضریب هدایت حرارتی یکسان عیوب گازی کمتر رخ می‌دهد.  
- ساختار منطقه جوش در اتصال هم‌جنس ریزدانه‌تر از اتصال

اما تست‌های خمش ریشه و خمش کرده به صورت کیفی گزارش شده و وجود و میزان عیوب به وجود آمده بعد از خمش ۱۸۰ درجه‌ای نمونه را گزارش می‌کند.

آزمون‌های کشش و خمش در محدوده دامنه گواهینامه استاندارد **ISO/IEC 17025** قرار دارد و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۳۵ درصدی انجام شده‌اند. استاندارد مرجع آزمون **ASME BPVC IX 2021** می‌باشد. [۲-۸]

## نتایج و بحث

### - تست رادیوگرافی

نتایج حاصل از اسکن فیلم‌های رادیوگرافی نشان داد که اتصال هم‌جنس **Corten A** آخال‌های کروی حین جوشکاری در طول جوش به وجود آمده است که اندازه بزرگ‌ترین آخال به وجود آمده برابر با ۱/۸ میلی‌متر بوده است و در بررسی اسکن فیلم‌های رادیوگرافی اتصال غیرهمجنس فولاد **Corten A** آخال‌های کروی و آخال خطی در حین فرایند جوشکاری به وجود آمده است که اندازه بزرگ‌ترین آخال کروی ۰/۷ میلی‌متر و اندازه آخال خطی ۲/۵ میلی‌متر بود. تعداد و پراکندگی آخال‌های کروی در اتصال غیرهمجنس فولاد **Corten A** بیشتر از اتصال هم‌جنس فولاد **Corten A** بود.

### - ریزساختار

ریزساختار فولاد هوا ناپذیر **Corten** در شکل (۲) و فولاد **St12** در شکل (۳) نشان داده شده است. ریزساختار هر دو فولاد را فریت به همراه ذرات سمانتیت و کاربیدهای فلزی تشکیل می‌دهد. در بررسی‌های میکروسکوپی مشاهده شد که ساختار منطقه جوش کاملاً درشت‌دانه است و ریزساختار منطقه جوش در اتصال هم‌جنس و غیرهمجنس شامل فریت سوزنی، فریت ویدمانشتاتن و فریت آلوتریومورف (فریت مرزدانه‌ای) است که در این مناطق مشاهده شد. ریزساختار منطقه جوش در اتصال هم‌جنس در شکل (۴) و اتصال غیرهمجنس در شکل (۵) مشاهده می‌شود. عدد اندازه دانه طبق استاندارد **ASTME112** اندازه‌گیری شد که در ورق فولاد هوا ناپذیر **Corten A** برابر با ۱/۶ و عدد اندازه دانه در ورق فولاد ساده کربنی برابر با ۱/۴ است. عدد اندازه دانه در منطقه جوش در اتصال هم‌جنس برابر با ۲ و در اتصال غیرهمجنس برابر با ۲/۱ اندازه‌گیری شد. بررسی‌های متالوگرافی کمی نشان داد که ریزساختار فولاد هوا ناپذیر **Corten A** شامل ۸۶ درصد فریت و ۱۴ درصد سمانتیت، ریزساختار فولاد ساده کربنی **St12** شامل ۹۲ درصد فریت و ۸ درصد سمانتیت، ریزساختار اتصال هم‌جنس فولاد هوا ناپذیر **Corten A** شامل ۶۰ درصد ساختار ویدمانشتاتن، ۱۴ درصد فریت مرزدانه‌ای و ۲۶ درصد فریت سوزنی و ریزساختار اتصال غیرهمجنس فولاد هوا ناپذیر **Corten A** شامل ۵۷ درصد ساختار ویدمانشتاتن ۶ درصد فریت مرزدانه‌ای و ۳۷ درصد فریت سوزنی است.

Heredia, A., Garca Ibez De Opakua, A., & Madariaga, J. M. (2012). Portable Raman study on the conservation state of four CorTen steel-based sculptures by Eduardo Chillida impacted by urban atmospheres. *Journal of Raman Spectroscopy*, 43(8), 1111-1117. <https://doi.org/10.1002/jrs.3158>

6-Mansouri, H. (2014). PH effect microbial corrosion of Corten steel and Carbon steel in oily waste water with *Pseudomonas Aeruginosa*. *IOSR Journal of Engineering*, 4(1), 28-32. <https://doi.org/10.9790/3021-04162832>

7-Mansouri, H., Alavi, S. A., & Fotovat, M. (2015). Microbial-Influenced Corrosion of Corten Steel Compared with Carbon Steel and Stainless Steel in Oily Wastewater by *Pseudomonas aeruginosa*. *Jom*, 67(7), 1594-1600. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1429-1>

8- Deepak, J. R., Bupesh Raja, V. K., & Kaliaraj, G. S. (2019). Mechanical and corrosion behavior of Cu, Cr, Ni and Zn electroplating on corten A588 steel for scope for betterment in ambient construction applications. *Results in Physics*, 14, 102437. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102437>

9-Sahoo, G., Deva, A., Singh, B., & Sexena, A. (2014). Corrosion Behaviour of High Phosphorus Containing Cu - Cr Weather Resistant Steel. 24(2), 1-7. <https://doi.org/10.14456/jmmm.2014.9>

10-Morcillo, M., D'az, I., Cano, H., Chico, B., & de la Fuente, D. (2019). Atmospheric corrosion of weathering steels. Overview for engineers. Part I: Basic concepts. *Construction and Building Materials*, 213, 723-737. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.334>

11-Morcillo, M., D'az, I., Cano, H., Chico, B., & de la Fuente, D. (2019). Atmospheric corrosion of weathering steels. Overview for engineers. Part II: Testing, inspection, maintenance. *Construction and Building Materials*, 222, 750-765. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.155>

## پی نوشت

- 1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی؛
- 2- استادیار، گروه متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی؛
- 3- دانشیار، گروه متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی؛
- 4- دانشیار، گروه متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی؛

غیرهمجنس است. وجود عناصر آلیاژی مانند مس و کروم و تشکیل کاربیدهای فلزی در فولادهای هوا ناپذیر **Corten A** باعث شده است تا انتقال حرارت با سرعت کمتری رخ دهد و عدد اندازه دانه در منطقه جوش بزرگتر از اتصال غیرهمجنس باشد. همچنین سختی اتصال در منطقه جوش و منطقه متأثر از جوش در اتصال همجنس بیشتر از اتصال غیرهمجنس است که به دلیل وجود همین عناصر آلیاژی و تشکیل کاربیدهای فلزی است. تقدیر و تشکر با تشکر از شرکت طاهای قالب توس در حمایت از این پروژه که انجام فرایندهای اتصال دهی فولاد هوا ناپذیر **Corten A** را بـه عهده گرفتند.

## منابع

1-Deepak, J. R., Bupesh Raja, V. K., Viswanatha Reddy, P., Lakshmi Venkata Sai, L., & Ashok Kumar Reddy, G. (2019). Investigation of microstructural and metallurgical properties of corten A588 grade steel gtaw joints. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 9(5), 1257-1264. <https://doi.org/10.24247/ijmperdoct2019111>

2-Vairamani, V., Mohan, N., Venkatesh, Karthikeyan, S. K., & Sakthivel, M. (2020). Optimization and microstructure analysis of Corten steel joint in mag welding by post heat treatment. *Materials Today: Proceedings*, 21(xxxx), 673-680. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.737>

3-Deepak, J. R., Bupesh Raja, V. K., Jeswin Arputhabalan, J., Yupendra Kumar, G. R., & Thomas, S. K. (2019). Experimental investigation of corten A588 filler rod for welding weathering steel. *Materials Today: Proceedings*, 16, 1233-1238. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.219>

4-Abioye, T. E., Ariwoola, O. E., Ogedengbe, T. I., Farayibi, P. K., & Gbadeyan, O. O. (2019). Effects of welding speed on the microstructure and corrosion behavior of dissimilar gas metal arc weld joints of AISI 304 stainless steel and low carbon steel. *Materials Today: Proceedings*, 17, 871-877. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.383>

5-Aramendia, J., Gomez-Nubla, L., Castro, K., Martinez-Arkarazo, I., Vega, D., Sanz Lopez De



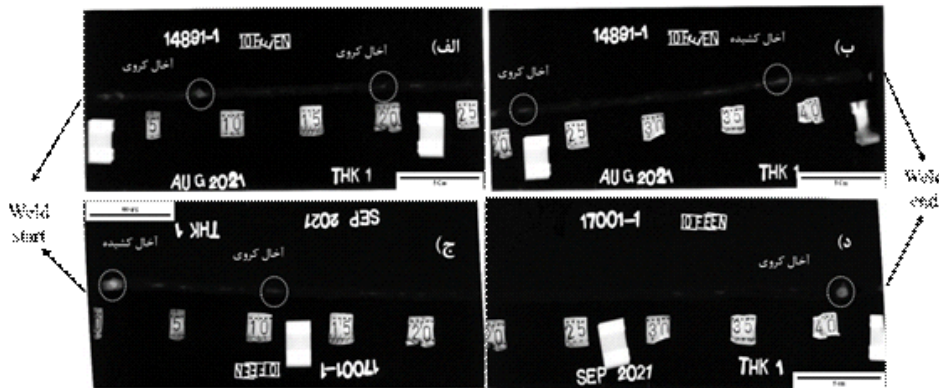
# Welding Research

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد هوا ناپذیر Corten A و فولاد ساده کربنی St12

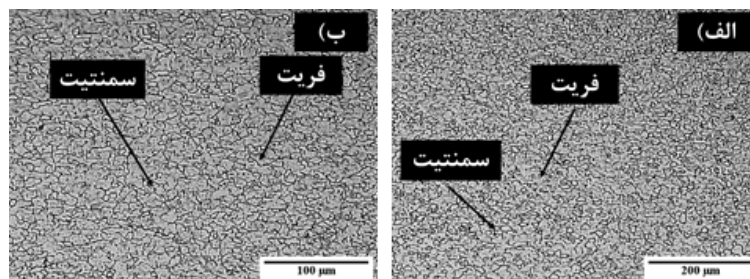
Steel Grade	Fe	Cr	Ni	Mo	C	Si	Mn	P	S	Nb	Al	Cu	Co	N
Cor-ten A	98.1	0.547	0.24	0.008	0.052	0.31	0.435	0.094	0.006	0.007	0.011	0.13	0.002	0.017
St12	99.225	-	-	-	0.053	0.025	0.417	0.006	0.005	-	0.041	0.011	-	0.013

جدول ۲- پارمترهای جوشکاری اتصال هم جنس و غیرهمجنس فولاد Corten A

اتصال غیرهمجنس Corten A	اتصال هم جنس Corten A	متغیرهای جوشکاری
Multi Mig 1611	Multi Mig 1611	دستگاه جوشکاری
۲۵۰	۲۵۰	نازل جوشکاری
۱۸/۶	۱۹	دامنه ولتاژ ( ولت )
۷۹-۸۱	۷۸-۸۱	دامنه جریان ( آمپر )
۵	۵	نرخ تزریق سیم جوش ( متر بر دقیقه )
۱۴	۱۴	نرخ گاز محافظ ( لیتر بر دقیقه )
۳۶/۵	۴۱/۴	سرعت جوشکاری ( سانتی متر بر دقیقه )
ER70S-6 ( 0.8 mm )	ER70S-6 ( 0.8 mm )	فلز پرکننده
3G	3G	موقعیت جوشکاری
CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	گاز محافظ

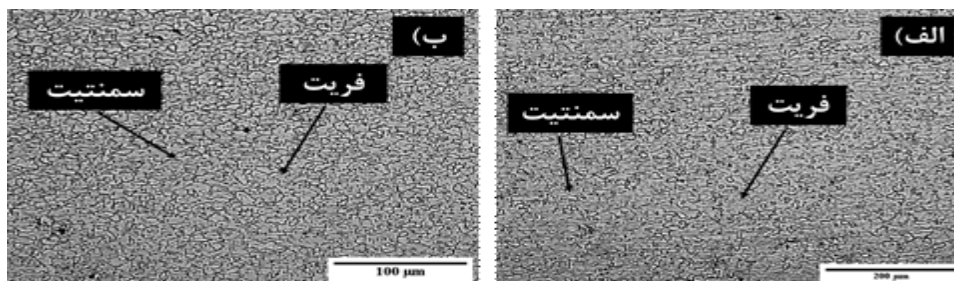


شکل ۱- اسکن فیلم‌های رادیوگرافی از مقطع اتصال الف و ب- اتصال هم جنس فولاد Corten A ج و د- اتصال غیرهمجنس فولاد Corten A

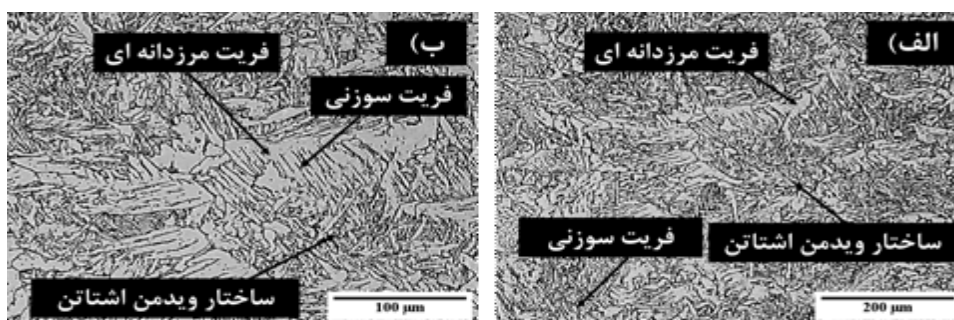


شکل ۲- ریزساختار فولاد Corten A الف - بزرگنمایی ۱۰۰X ب- بزرگنمایی ۲۰۰X

# Welding Research



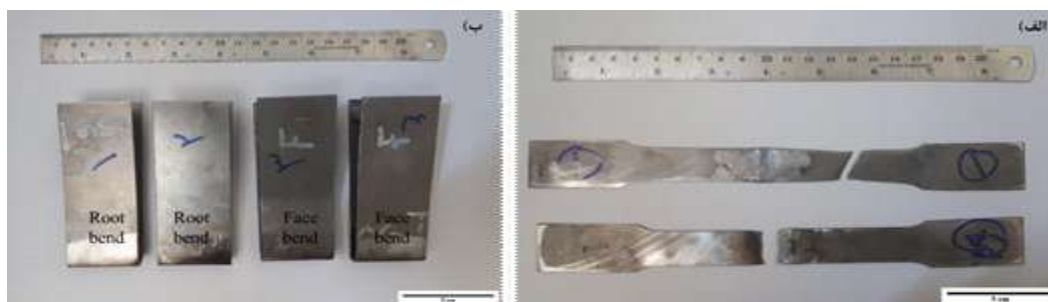
شکل ۳- ریزساختار فولاد St12 الف- بزرگنمایی ۱۰۰X ، ب- بزرگنمایی ۲۰۰X



شکل ۴- ریزساختار اتصال هم جنس فولاد Corten A الف- بزرگنمایی ۱۰۰X ب- بزرگنمایی ۲۰۰X

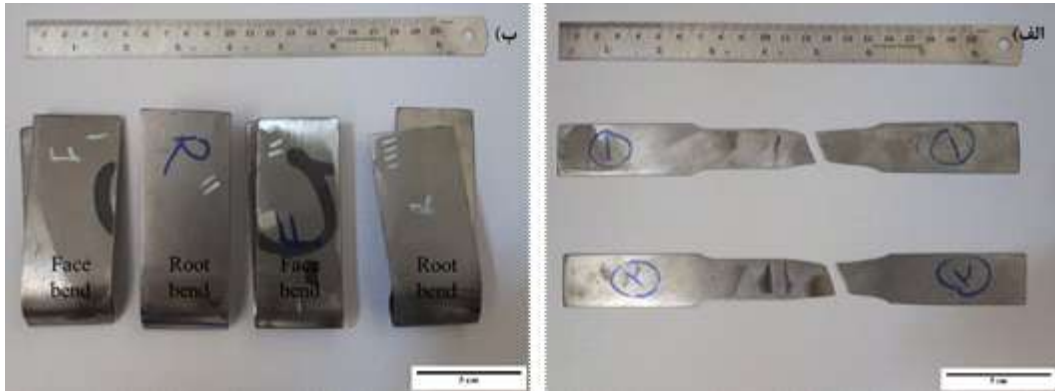


شکل ۵- ریزساختار اتصال غیرهمجنس فولاد Corten A الف- بزرگنمایی ۱۰۰X ب- بزرگنمایی ۲۰۰X

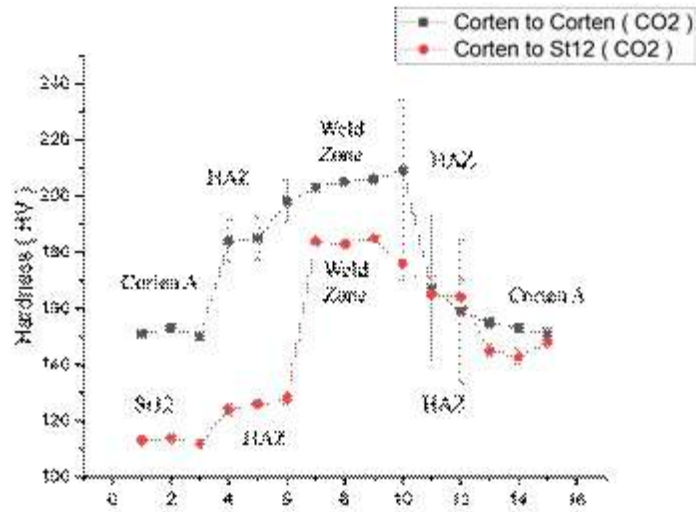


شکل ۶- نمونه های خواص مکانیکی اتصال هم جنس فولاد Corten A الف- تست کشش ب- تست خمش ریشه و خمش گرده جوش

# Welding Research



شکل ۷- نمونه‌های خواص مکانیکی اتصال هم‌جنس فولاد Corten A الف- تست کشش ب- تست خمش ریشه و خمش گرده جوش



شکل ۸- پروفیل سختی جوش اتصال هم‌جنس فولاد Corten A (خط مشکی) و سختی جوش اتصال غیرهم‌جنس فولاد Corten A (خط قرمز)

