



Evaluation of heat input on microstructural and mechanical properties of dissimilar joints of D6AC steel to VCN 200 (1.6580) in GTAW welding

M. Mizabi Asl, M. Belbasi*

Department of Petroleum, Materials and Mineral Engineering, Faculty of Civil Engineering and Land Resources, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran.

Received 16 August 2024 ; Accepted 22 October 2024

Abstract

In this research, the effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of the joint of two dissimilar steels D6AC and VCN 200 steel was investigated. For this purpose, the samples were welded with the current intensity of 130, 145 and 160 Amperes by GTAW process and using ER120 SG welding wire with a diameter of 2.4 mm. The metallographic results showed that the microstructure of the weld metal consisted of lath martensite and acicular ferrite phases, which increased the volume fraction of ferrite from 5 to 32% with the increase of heat input, and the morphology of the ferrite changed from acicular to polygonal ferrite due to the decrease in the cooling rate. The HAZ area microstructure consist of bainite, lath martenrite and ferrite. The highest strength value was obtained in the welded sample with low heat input. With the increase of heat input, the tensile strength has decreased from 1154 to 965 MPa. Also, with the increase of heat input, the impact energy has increased in the welding zone due to the increase of stable phases, and in the HAZ zone due to the growth of the primary austenite grains and the reduction of the grain boundary locking effect. The results of the fracture analysis showed that the fracture occurred in the weld zone with low heat input, brittle fracture, and in the HAZ area, combination of ductil and brittle fracture occurred. With the increase in heat input, dutil fracture occurred in the welding zone and brittle fracture occurred in the HAZ zone due to grain growth.

Keywords: Heat input, Impact energy, Microstructure, D6AC, VCN200 steels.

*Corresponding Author M. Belbasi, dr.belbasi@gmail.com



ارزیابی حرارت ورودی بر تحولات ریزساختاری و خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه فولاد D6AC به VCN 200 (1.6580) در جوشکاری GTAW

مهدی میزایی اصل، مجید بلباسی*

گروه مهندسی نفت، مواد و معدن، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران.

دریافت مقاله: 1403/05/26؛ پذیرش مقاله: 1403/08/01

چکیده

در این تحقیق اثر حرارت ورودی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال دو فولاد نامشابه D6AC و VCN 200 بررسی شد. بدین منظور نمونه‌ها با شدت جریان‌های 130، 145 و 160 آمپر با فرایند GTAW و با استفاده از سیم جوش ER120 SG با قطر 2/4 mm جوشکاری شدند. نتایج متالوگرافی نشان داد ریزساختار فلزجوش شامل فازهای مارتنزیت و فریت سوزنی بود که با افزایش حرارت ورودی کسر حجمی فریت از 5 به 32% افزایش و مورفولوژی فریت از سوزنی به فریت چند وجهی بدلیل کاهش نرخ سرمایش تغییر یافته است. منطقه HAZ دارای ریزساختار بینیت، مارتنزیت و فریت بود. بیشترین مقدار استحکام در نمونه جوشکاری شده با حرارت ورودی کم بدست آمد. با افزایش حرارت ورودی استحکام کششی از 1154 به 965 MPa کاهش یافته است. همچنین با افزایش حرارت ورودی، انرژی ضربه در منطقه جوش بدلیل افزایش فازهای پایدار افزایش، و در منطقه HAZ بدلیل رشد دانه‌های آستنیت اولیه و کاهش اثر قفل‌شوندگی مرز دانه‌ها کاهش یافته است. نتایج حاصل از شکست‌نگاری نشان داد شکست در منطقه جوش با حرارت ورودی کم، شکست ترد، و در منطقه HAZ ترکیبی از شکست نرم و ترد اتفاق افتاده است. با افزایش حرارت ورودی در منطقه جوش شکست کاملاً نرم و در منطقه HAZ شکست ترد بدلیل رشد دانه رخ داده است.

کلمات کلیدی: حرارت ورودی، انرژی ضربه، ریزساختار، فولادهای D6AC، VCN200.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: مجید بلباسی، dr.belbasi@gmail.com

1- مقدمه

فولادهای ساختمانی تجاری که استحکام حداقل 1380 MPa داشته باشند، فولادهای فوق مستحکم نامیده می‌شوند [1]. به دلیل استحکام فوق العاده و توان کاهش وزن قطعات این فولادها در صنایع هوافضا کاربرد ویژه‌ای پیدا کرده‌اند [1]. فولاد D6AC از جمله فولادهای فوق مستحکم کم آلیاژ با کربن متوسط بوده که در ترکیب شیمیایی خود وانادیوم، کروم و

مولیبدن بیشتر و نیکل کمتر نسبت به فولاد AISI 4340 دارد [2]. فولاد VCN 200 جزء فولادهای عملیات حرارتی پذیر با استحکام بالا بوده که حاوی عناصر نیکل، کروم و مولیبدن می‌باشد. این فولاد از شکل پذیری بالا توأم با استحکام زیاد برخوردار بوده و دارای استحکام خستگی و خزش خوبی است [3]. خواص مکانیکی مقاطع جوش فولادها به عواملی از قبیل حرارت ورودی، نرخ سرد شدن، ترکیب شیمیایی فلزجوش،

کاهش جوش پذیری آن‌ها شده است. لذا فولادهای D6AC و VCN200 جزء فولادهای با قابلیت جوش‌پذیری پایین می‌باشند [17]. به همین دلیل عملیات حرارتی پیشگرم و پسگرم در محدوده کمی بالاتر از دمای شروع مارتنزیت و استفاده از سیم جوش‌های فritti کم هیدروژن توصیه شده است [15-16]. تحقیقات صورت گرفته از حرارت ورودی بهینه تشکیل ریزساختارهای بینت و فریت سوزنی را توصیه کردند که باعث می‌شود در شرایط کاربرد در استحکام‌های بالا، چقرمگی مناسب همراه با مقاومت به ضربه بالا مورد استفاده قرارگیرد [18-19]. اثر حرارت ورودی بر ریزساختار و خواص مکانیکی مقاطع جوش فولاد کم آلیاژ کربن متوسط در شرایط کوئنچ و بازپخت توسط ال‌کمید [20] نشان داد که در حرارت ورودی بسیار کم ($0/5 \text{Kj/mm}$) در منطقه درشت دانه HAZ، مناطق سخت و مستعد ترک بیشتر است در حالی که در حرارت ورودی بالاتر از ($1/2 \text{Kj/mm}$) هیچگونه ترکی مشاهده نشد. ون و همکاران [21] با بررسی تاثیر حرارت ورودی بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولادهای استحکام بالا دریافتند که با افزایش حرارت ورودی، ریزساختار فلزجوش از فریت سوزنی به فریت ویدمن اشتاتن تغییر یافته است. همچنین در منطقه HAZ با افزایش حرارت ورودی از $7/5$ به $10/5 \text{Kj/cm}$ ریزساختار از مارتنزیت کامل به مخلوطی از مارتنزیت لایه‌ای و بینیت، و با افزایش حرارت به $18/5 \text{Kj/cm}$ به بینیت دانه‌ای تغییر یافته است که این تغییر ساختار با افزایش حرارت ورودی باعث کاهش استحکام تا 135MPa شده است. دنگ و همکاران [22] تاثیر حرارت ورودی بر ریزساختار و خواص مکانیکی را در منطقه HAZ فولاد TWIP با حرارت جوشکاری شبیه سازی شده مورد بررسی قرار دادند. با افزایش حرارت ورودی به دلیل انحلال ذرات AIN رشد دانه و رسوب کاربرد در مرز دانه اتفاق افتاده است. وجود کاربرد در مرز دانه‌ها باعث کاهش چقرمگی در منطقه HAZ این فولادها شده است. استحکام بخشی از طریق ریزدانه شدن در این فولادها بدست آمده است. جوشکاری فولادهای غیرمشابه موجب ایجاد ریزساختارهای متفاوت در نواحی مختلف جوش شده و خواص مکانیکی از

پیشگرم، پسگرم و اندازه دانه آستنیت اولیه بستگی دارد. حرارت ورودی یکی از پارامترهای مهمی است که تحقیقات زیادی در زمینه تاثیر آن بر خواص مکانیکی جوش انجام گرفته است. بیشتر پژوهش‌ها نشان داد با افزایش حرارت ورودی یا کاهش نرخ سرمایش، باعث کاهش چقرمگی، سختی [4-5]، استحکام تسلیم و استحکام کششی [6-7] در فلزجوش و منطقه HAZ می‌شود. با افزایش حرارت ورودی، ضمن رشد دانه، باعث تشکیل محصولات دما بالا مانند، فریت پرویوکتوئید، فریت ویدمن اشتاتن و بینیت بالایی می‌شود که تشکیل این ریزساختارها باعث کاهش چقرمگی منطقه جوش می‌شود [4]. حرارت ورودی بالا منجر به تشکیل منطقه HAZ عریض و کاهش چقرمگی با رشد دانه‌های آستنیت اولیه می‌شود [8-9]. جوشکاری غیرمشابه به عنوان یک روش اتصال در صنایع مختلف، برای اتصال فولادهای کم آلیاژ که به‌طور گسترده در مخازن تحت فشار و مبدل‌های حرارتی به کار می‌روند، استفاده می‌شود. جوشکاری غیرمشابه فولادها موجب ایجاد ریزساختارهای متفاوت در نواحی مختلف جوش شده و خواص مکانیکی از جمله سختی و چقرمگی را تحت تاثیر قرار می‌دهد [10].

فولادهای فوق مستحکم کم آلیاژ با کربن متوسط با توجه به درصد کربن معادل بالا قابلیت جوش پذیری پایینی دارند و در صورت لزوم در حالت آنیل شده جوشکاری بر روی آن‌ها صورت می‌گیرد. همچنین می‌بایست از یک فرایند جوشکاری محافظت شده در برابر هیدروژن با تمرکز حرارتی بالا نظیر GTAW، پرتو الکترونی و لیزر استفاده شود [11-12]. کاربرد این فولادها در شرایط استحکام‌های بسیار بالا با کاهش چشمگیر چقرمگی شکست و شکست ترد به ویژه در مناطق نزدیک به منطقه جوش همراه است. این ویژگی شکننده عمدتاً بدلیل تشکیل فاز سخت اولیه، ساختار دانه درشت و منطقه شکننده موضعی در ناحیه HAZ در حین حرارت جوشکاری ذوبی است [13-14]. تنش‌های ناشی از سردشدن غیریکنواخت و تغییر حجم ناشی از تشکیل مارتنزیت نیز منجر به ایجاد ترک می‌شود [15-16]. وجود عناصر آلیاژی کروم، نیکل و مولیبدن در ترکیب شیمیایی این دو فولاد، باعث افزایش سختی‌پذیری و

2-1- فرایند جوشکاری

فرایند جوشکاری GTAW با دستگاه Pars EL 501 P بصورت دستی با استفاده از سیم جوش ER120 SG با قطر 2/4 mm به صورت دو پاسه با سه حرارت ورودی انجام شد. برای محاسبه حرارت ورودی از رابطه (3) استفاده گردید [25].

$$HI = \eta \times \frac{V \times I}{1000 S} \quad (3)$$

در این رابطه V ولتاژ، I شدت جریان، S سرعت جوشکاری برحسب میلی متر بر ثانیه و η بازده جوشکاری است که برای فرایند GTAW، 95% در نظر گرفته شد. جدول (2) متغیرهای جوشکاری و پارامترهای استفاده شده در فرایند جوشکاری GTAW را نشان می دهد.

جدول 2- پارامترهای جوشکاری مورد استفاده در فرایند GTAW

حرارت ورودی KJ/mm	نوع پاس	ولتاژ (V)	سرعت جوشکاری mm/s	جریان (A)	کد نمونه
1.29 1.4	پاس ریشه پاس رو	27	2.5	130	VD1
1.29 1.56	پاس ریشه پاس رو	27	2.5	145	VD2
1.29 1.73	پاس ریشه پاس پرکننده	27	2.5	160	VD3

برای هر نمونه از یک پاس ریشه و یک پاس پرکننده استفاده شد. برای محافظت از منطقه جوش، از گاز آرگون با خلوص 99/99% استفاده شد. ترکیب شیمیایی سیم جوش کم کربن مورد استفاده شده در جدول (3) نشان داده شده است.

جدول 3- ترکیب شیمیایی سیم جوش مورد استفاده (درصد وزنی)

نام عنصر	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni	S
درصد عنصر	0.048	0.045	1.65	0.011	0.048	0.48	3.4	0.012

برای مهار نمونه ها در حین جوشکاری از نگهدارنده با المنت حرارتی جهت انجام عملیات حرارتی پیشگرم استفاده شد. برای کنترل دمای پیشگرم و پسگرم، از دماسنج لیزری و گچ حرارتی بهره گرفته شد. دمای عملیات حرارتی پیشگرم 300°C و عملیات حرارتی پسگرم در دمای 310°C به مدت 20 دقیقه ادامه یافت.

شماتیک طرح اتصال که براساس استاندارد AWS D17.1 [26] تعیین شد در شکل (1) نشان داده شده است. برای بررسی ریزساختار مناطق مختلف جوش از میکروسکوپ نوری مدل

جمله سختی و چقرمگی را تحت تاثیر قرار می دهد [23]. از اینرو بررسی خواص مکانیکی اتصال های غیرمشابه از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به بررسی های صورت گرفته، اغلب پژوهش های انجام شده بر روی خواص مکانیکی جوش در زمینه اتصال مشابه این فولادها بوده و بررسی اتصال غیرمشابه این فولادها به روش GTAW کمتر توجه شده است. لذا در این تحقیق اثر حرارت ورودی بر خواص مکانیکی و ریزساختار اتصال غیرمشابه فولاد D6AC به VCN200 با انجام عملیات حرارتی پیشگرم و پسگرم مورد بررسی گرفته است.

2- روش تحقیق

در این تحقیق از ورق های فولادی D6AC و VCN 200 با ترکیب شیمیایی مطابق جدول (1) استفاده شد. ورقه های فولادی مورد استفاده به ابعاد 120×70×3 mm در شرایط آنیل کامل برای فولاد D6AC (در دمای 850°C به مدت 30 دقیقه نگه داشته سپس تا دمای 530°C در داخل کوره سرد کرده و به مدت 10 دقیقه در این دمای نگهداری شده سپس نمونه ها تا دمای اتاق در محیط سرد شدند) و برای فولاد VCN 200 (در دمای 850°C به مدت 30 دقیقه نگهداری بعد از آن در داخل کوره عملیات حرارتی تا دمای محیط سرد شدند). بعد از ماشین کاری، سنگ زنی و پخش سازی لبه ها، ورق های آماده جوشکاری در کنار یکدیگر توسط نگهدارنده تثبیت شدند تا از طرح اتصال لب به لب جناغی یک طرفه با زاویه 30 درجه و درز ریشه 1mm برای ایجاد اتصال استفاده شود.

جدول 1- ترکیب شیمیایی فولادهای مورد استفاده (درصد وزنی)

نوع فولاد	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V
D6AC	0.490	0.250	0.759	0.686	0.943	0.857	0.118
VCN200	0.306	0.254	0.549	1.89	2.02	0.349	0.012

مقدار کربن معادل و اندیس حساسیت [24] به ترک با توجه به رابطه (1 و 2) برای فولاد D6AC به ترتیب 1/05 و 74/7% و برای فولاد VCN 200، 1 و 57% محاسبه گردید.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni + Cu}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5} \quad (1)$$

$$CE = C + \frac{Mn}{16} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr}{23} + \frac{Mo}{7} + \frac{Nb}{8} + \frac{V}{9} \quad (2)$$

کاهش یافته است. جهت محاسبه نرخ سرد شدن در حرارت‌های ورودی مختلف، فرض شد تمامی نمونه‌ها از 1500°C تا دمای پیش گرم 300°C سرد شدند.

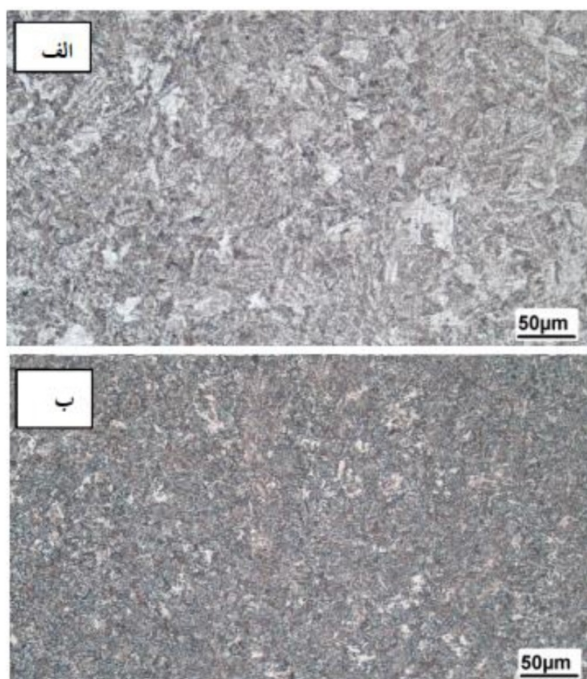
جدول 4- مقادیر نرخ سرد شدن و زمان سرد شدن

کد نمونه	حرارت ورودی KJ/mm	نرخ سرد شدن $^{\circ}\text{C/s}$	$\Delta t_{8/5}$ (s)
VD1	1.4	333	16.69
VD2	1.56	244	18.68
VD3	1.73	191	20.94

3-1- بررسی ریزساختار

3-1-1- ریزساختار فلز پایه

شکل (2) تصویر ریزساختار فلز پایه فولادهای D6AC و VCN200 را در حالت آنیل کامل قبل از جوشکاری به ترتیب در شکل‌های الف و ب نشان می‌دهد. همانطوری که در شکل (2) مشاهده می‌شود ریزساختار فولاد D6AC شامل جزایر کوچک فریت در زمینه مارتنزیت تمپر شده و ریزساختار فولاد VCN 200 حاوی فازهای فریت و بینت می‌باشد.

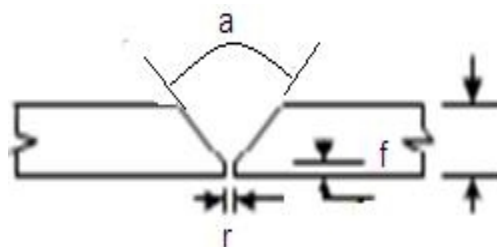


شکل 2- ریزساختار فلز پایه الف - D6AD و ب - VCN200

پس از آنیل کامل

در شکل (3) تصویر درشت ساختار مناطق مختلف جوش را براساس حرارت‌های ورودی مختلف نشان می‌دهد. مرز بین پاس‌های اول و دوم جوشکاری و محل اتصال با فلز پایه و

BX51M استفاده شد. همچنین جهت آماده سازی نمونه‌ها، ابتدا برشکاری با سیم داغ در ابعاد $10 \times 20 \text{ mm}$ انجام شد و پس از سمباده زنی و پولیش از محلول اچ نایتال 2% جهت مشاهده ریزساختار استفاده شد. جهت تشخیص فازها از محلول حکاکی شامل 10 گرم اسید پیکریک به همراه 3 گرم کلرید مس و 90 گرم آب مقطر استفاده شد. جهت بررسی مقدار درصد فازها از نرم افزار کلمکس استفاده شد. در این تحقیق از آزمون‌های سختی سنجی، کشش برای تعیین خواص مکانیکی استفاده شد. سختی سنجی به روش ویکرز برای رسم پروفیل سختی نمونه‌های مقطع جوش استفاده شد. برای بررسی خواص کششی از دستگاه کشش مدل W+B با ظرفیت 10 تن طبق استاندارد ASTM E8 در دمای محیط و با نرخ کرنش 5 mm/min استفاده شد. برای تعیین انرژی ضربه جوش و مناطق HAZ در دو طرف فلز جوش، برای هر حرارت ورودی شش نمونه ضربه به ضخامت $2/5 \text{ mm}$ طبق استاندارد ASTM E23 ساخته و در دمای محیط آزمایش شدند.



شکل 1- شماتیک طرح اتصال جوشکاری شده.

$a = 30 \text{ mm}$, $r = 1 \text{ mm}$, $f = 1 \text{ mm}$

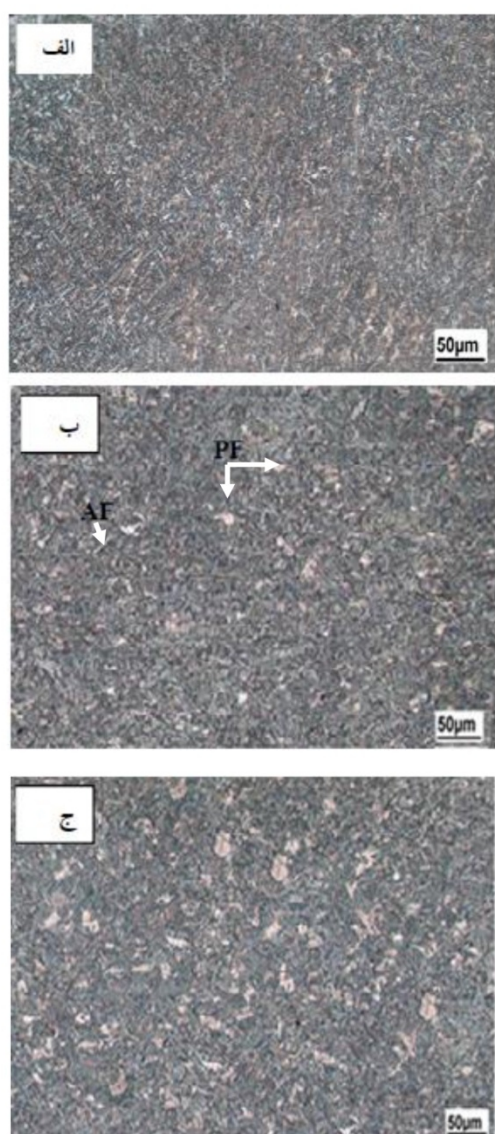
3- نتایج و بحث

مقادیر نرخ سرد شدن و زمان سرد شدن از 800 به 500 درجه سانتی گراد ($\Delta t_{8/5}$) در منطقه HAZ نزدیک به منطقه جوش از رابطه انتقال حرارت رزنال (رابطه 4) [27] محاسبه و در جدول (4) نشان داده شده است.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_x = \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_t \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_T = -2\pi KV \frac{(T-T_0)}{q} \quad (4)$$

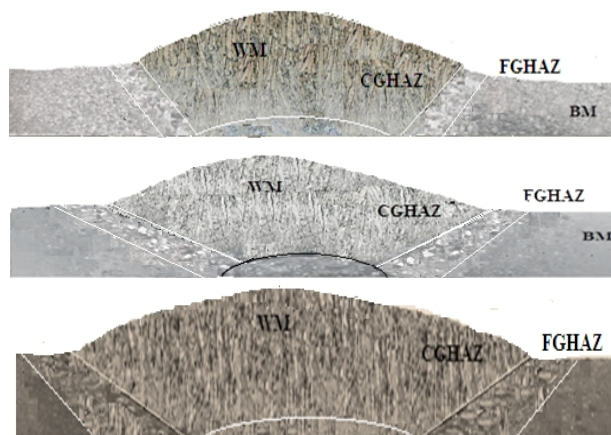
با افزایش حرارت ورودی میزان سرد شدن کاهش و زمان سرد شدن ($\Delta t_{8/5}$) افزایش یافته است. با افزایش حرارت ورودی، میزان گرمای وارد شده در واحد حجم افزایش یافته است و بدلیل یکسان بودن شرایط محیطی نمونه‌ها، سرعت سرد شدن

غالب ریزساختار در منطقه جوش مارتنزیت و فریت است. مورفولوژی فاز فریت در منطقه جوش، سوزنی است. در نمونه با حرارت ورودی $1/56 \text{ KJ/mm}$ (ب) با افزایش حرارت ورودی از میزان فاز مارتنزیت کاسته و بر مقدار فاز فریتی افزوده شده است در این نمونه علاوه بر وجود فریت سوزنی فریت چند وجهی نیز در اثر افزایش حرارت، تشکیل شده است. در نهایت با افزایش حرارت ورودی به $1/73 \text{ KJ/mm}$ مطابق شکل (4-ج) فاز فریتی بیشتری تشکیل شده است. ضمن اینکه مورفولوژی فاز فریت از سوزنی به فریت چند وجهی تغییر یافته است.



شکل 4- تصاویر مقاطع جوش در حرارت های ورودی
الف- $1/4$ ، ب- $1/56$ و ج- $1/73 \text{ KJ/mm}$

گسترده‌گی ناحیه HAZ در تمامی نمونه‌ها کاملاً مشخص است. در پاس ریشه به دلیل گرمایش ناشی از جوشکاری پاس رو یا پرکننده، دانه‌ها بصورت هم محور تغییر شکل یافته است. در پاس پرکننده، دانه‌های ستونی در جهت انتقال حرارت به سمت گرده جوش رشد کرده‌اند [28]. بعد از این مراحل به دلیل تجربه دمایی بالاتر ناشی از سیکل‌های جوشکاری منطقه دانه درشت، و در فواصل دورتر از جوش، منطقه ریزدانه تشکیل شده است. با افزایش حرارت ورودی، نفوذ جوش، کامل و با افزایش پهنای جوش همراه بود که افزایش پهنای جوش با افزایش حرارت ورودی در طول جوشکاری ذوبی فولاد S700 MC توسط تومکووف و همکاران [29] نیز گزارش شده است.



شکل 3- تصویر مناطق مختلف جوش بر اساس حرارت ورودی
الف- $1/4$ ، ب- $1/56$ و ج- $1/73 \text{ KJ/mm}$

اندازه منطقه HAZ در حرارت های ورودی مختلف محاسبه و در جدول (5) گزارش شده است. نتایج جدول (5) نشان می‌دهد که با افزایش حرارت ورودی از $1/4$ به $1/73 \text{ KJ/mm}$ وسعت منطقه HAZ از $3/9$ به $5/2 \text{ mm}$ افزایش یافته است که در شکل (3-ج) قابل مشاهده می‌باشد.

جدول 5- اندازه‌گیری مقطع جوش در حرارت های ورودی مختلف

حرارت ورودی KJ/mm	عرض متوسط منطقه HAZ (mm)
1.4	3.9
1.56	4.5
1.73	5.2

شکل (4) تصاویر مقاطع جوش ورق‌های فولادی را در حرارت‌های ورودی مختلف نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود فاز

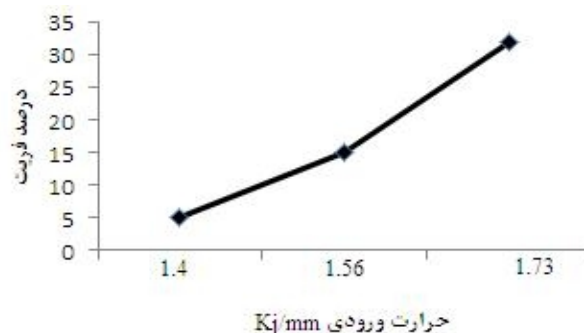
حرارت ورودی، سرعت سرد شدن کاهش یافته که این امر موجب فراهم شدن زمان لازم، برای رشد دانه‌های آستنیت اولیه می‌گردد. همچنین دمای بالای سیکل حرارتی ناشی از جوشکاری باعث افزایش دما در ناحیه درشت دانه شده، که این امر باعث انحلال رسوبات و کاهش اثر رسوبات در جلوگیری از رشد دانه‌ها شده است [31].

4- خواص مکانیکی

4-1- تغییرات ریزسختی

تغییرات ریزسختی در نواحی مختلف اتصالات جوش در هر سه حرارت ورودی در شکل (7) نشان داده شده است. در شرایط ترکیب شیمیایی یکسان، همواره سختی منطقه HAZ و فلزیایه کمتر از منطقه جوش است. در منطقه جوش بدلیل سرعت بالای سرد شدن و تشکیل فازهای غیرتعادلی سختی بالاتر می‌باشد. در حرارت ورودی $1/4 \text{ KJ/mm}$ به دلیل تشکیل مارتنزیت، سختی فلزجوش بیشتر شده است. در منطقه HAZ با تشکیل ریزساختار بینیت و مارتنزیت سختی کمتر از منطقه جوش حاصل گردید. با افزایش حرارت ورودی به $1/56 \text{ KJ/mm}$ به دلیل کاهش سرعت سرد شدن، مقدار بینیت و فریت چند وجهی افزایش یافته است. با افزایش حرارت ورودی، سختی در مناطق جوش و HAZ نسبت به نمونه با حرارت ورودی کمتر کاهش یافته است. در حرارت ورودی $1/73 \text{ KJ/mm}$ به دلیل تشکیل ریزساختار بینیت و فریت چند وجهی و درشت شدن دانه‌ها در اثر حرارت ناشی از جوشکاری میزان سختی در نواحی مختلف کاهش یافته است. همچنین انحلال رسوبات و بزرگ شدن دانه‌ها با کاهش اثر قفل شوندگی مرز دانه‌ها در اثر رشد دانه‌ها می‌تواند نقش موثری در کاهش سختی منطقه HAZ ایفا کند. ونوس و همکاران [32] گزارش نمودند که با افزایش حرارت ورودی جوش در فولادهای استحكام بالا به دلیل درشت شدن ریزساختار و عدم تشکیل مارتنزیت در HAZ و افزایش فاز بینیت و فریت میزان نرمی و افت سختی در HAZ نسبت به فلزجوش بیشتر شده است. چنایه [33] نیز اثر حرارت ورودی در جوشکاری GMAW بر

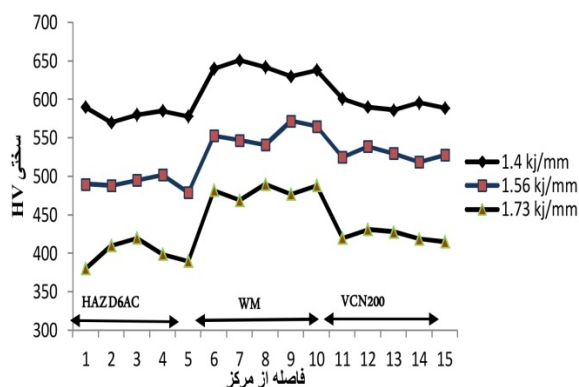
شکل (5) تغییرات میزان فاز فریت در منطقه جوش برحسب حرارت ورودی را با استفاده از نرم افزار کلمکس نشان می‌دهد. در حرارت ورودی $1/4 \text{ KJ/mm}$ میزان فاز فریت 5% بوده و با افزایش حرارت ورودی به $1/73 \text{ KJ/mm}$ میزان فاز فریت به 32% افزایش یافته است.



شکل 5- تغییرات فاز فریت در ریزساختار منطقه جوش براساس حرارت ورودی

3-2-1- بررسی ریزساختار ناحیه متأثر از حرارت (HAZ)

ریزساختار ناحیه درشت دانه در دو سمت ناحیه جوش برای فولادهای D6AC و VCN200 برای حرارت‌های ورودی $1/4$ ، $1/56$ و $1/73 \text{ KJ/mm}$ در شکل (6) چسبیده به مرز جوش نشان داده شده است. ریزساختار ناحیه HAZ درشت دانه عمدتاً مارتنزیت، بینیت و فریت می‌باشد. در حرارت ورودی کم شکل‌های (الف)، و (ب) به دلیل سرعت سرد شدن بالا در هر دو فلز، ریزساختار بینیت و مارتنزیت می‌باشد. با افزایش حرارت ورودی به $1/56 \text{ KJ/mm}$ در نمونه شکل‌های (ج) و (د) به دلیل سرعت سرد شدن کمتر نسبت به نمونه با حرارت ورودی $1/4 \text{ KJ/mm}$ علاوه بر ریزساختار بینیت و مارتنزیت، ریزساختار فریت سوزنی نیز در منطقه HAZ هر دو فلز مشاهده می‌شود. با این تفاوت که در منطقه HAZ فولاد D6AC فریت ویدمن اشتاتن نیز مشاهده شد. با افزایش حرارت ورودی، بیشینه دما در ناحیه HAZ نیز افزایش یافته که علاوه بر درشت شدن دانه‌ها و گسترش این ناحیه منجر به افزایش قابل ملاحظه فاز بینیت و فریت در ریزساختار گردیده است. با توجه به تصاویر مشخص است که با افزایش حرارت ورودی کسر حجمی بینیت و ابعاد آن افزایش یافته است. لازم به ذکر است با افزایش



شکل 7- تغییرات ریزسختی ناحیه اتصال برای حرارت‌های ورودی مختلف

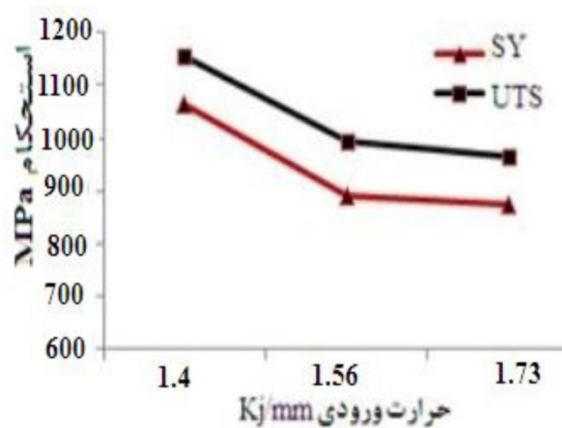
4-2- استحکام کششی

طبق شکل (8) شکست در ناحیه HAZ فولاد D6AC نمونه‌ها اتفاق افتاد. شکست در این ناحیه به دلیل کاهش سختی و پدیده نرم شدگی در ناحیه HAZ فولاد می‌باشد.



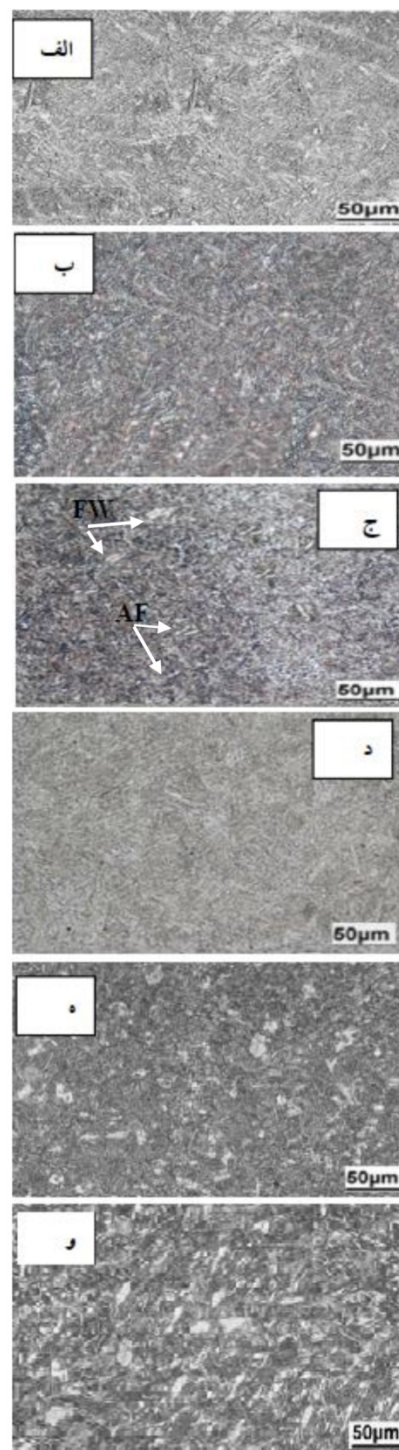
شکل 8- نمونه کشش شکسته شده در حرارت ورودی 1/73 KJ/mm

در شکل (9) نمودار استحکام تسلیم و کششی نمونه‌ها در حرارت‌های ورودی مختلف نشان شده است. طبق شکل نمونه با حرارت ورودی کم (1/4 KJ/mm)، به دلیل نرخ سرمایش بالاتر و تشکیل مارتنزیت بیشتر در منطقه HAZ، بالاترین میزان استحکام تسلیم و کششی به ترتیب 1064 و 1154 MPa را در بین نمونه‌ها داشت.



شکل 9- اثر حرارت ورودی مختلف بر استحکام کششی و تسلیم نمونه‌ها.

روی فولاد کربنی را بررسی نمود و نشان داد که با افزایش حرارت ورودی جوش، سختی در منطقه جوش و HAZ افت می‌کند.



شکل 10- تصاویر ریزساختار منطقه HAZ ورق‌های فولادی D6ac و VCN200

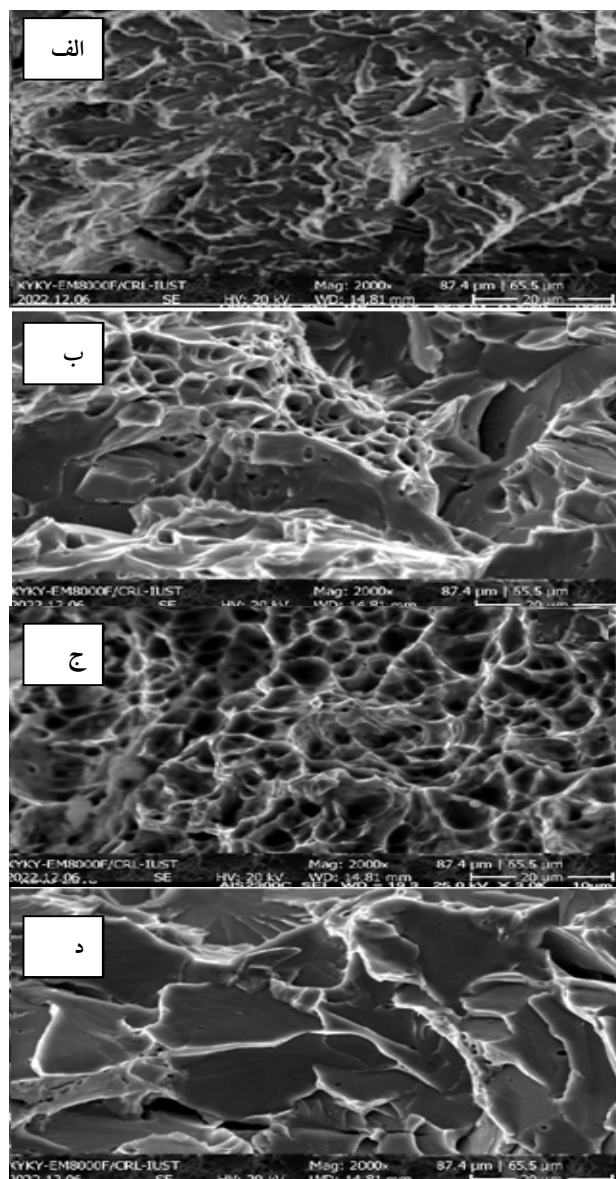
در حرارت ورودی (الف و ب- 1/4 KJ/mm، ج و د- 1/56 KJ/mm

ه و د- 1/73 KJ/mm

ورودی کم می‌باشد. با افزایش حرارت ورودی در منطقه HAZ، متوسط اندازه دانه اولیه نیز با افزایش حرارت ورودی، افزایش یافته است.

4-4- شکست‌نگاری

شکل (11) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست آزمون ضربه نمونه‌های فلزجوش و منطقه HAZ در حرارت‌های ورودی $1/4$ و $1/76$ KJ/mm را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌های

ضربه در حرارت ورودی $1/4$ KJ/mm، الف - منطقه جوش،

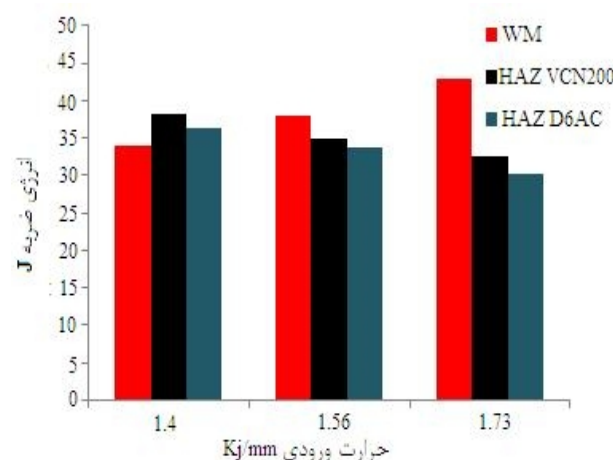
ب - منطقه HAZ و برای حرارت ورودی $1/73$ KJ/mm،

ج - منطقه جوش و د - منطقه HAZ

با افزایش حرارت ورودی به $1/56$ KJ/mm با کاهش مارتنزیت و افزایش فاز بینت و فریت در منطقه HAZ استحکام کششی و تسلیم به میزان 995 و 889 MPa کاهش یافته است. در نمونه با حرارت ورودی $1/73$ KJ/mm به سبب بزرگ شدن اندازه دانه‌ها، ناشی از سیکل‌های حرارتی جوشکاری در منطقه HAZ، کاهش مرز دانه‌ها به دلیل کاهش اثر قفل شونده‌گی و عدم تشکیل مارتنزیت، استحکام کاهش یافته است.

4-3- انرژی ضربه

تغییرات انرژی ضربه حاصل از شکست نمونه‌ها در آزمایش ضربه برحسب حرارت ورودی در شکل (10) نشان داده شده است. طبق شکل (10) با افزایش حرارت ورودی، انرژی ضربه فلزجوش افزایش یافته است. با توجه به یکسان بودن ترکیب شیمیایی فلزجوش در حرارت‌های ورودی مختلف علت تفاوت در انرژی ضربه به تفاوت در ریزساختار آن‌ها مربوط می‌شود.



شکل 10- تغییرات انرژی ضربه در منطقه جوش و منطقه HAZ

با افزایش حرارت ورودی نرخ سرد شدن فلزجوش کاهش یافته و ریزساختار فلزجوش از مارتنزیتی به بینیتی و فریتی تغییر کرده و میزان فریت در فلزجوش با افزایش حرارت ورودی از 5% به 32% افزایش یافته است که باعث افزایش انرژی ضربه در فلزجوش با افزایش حرارت ورودی شده است. اما انرژی ضربه برای منطقه HAZ با ریزساختار بینیت و فریت، در حرارت ورودی کم، افزایش یافته است. وجود فریت سوزنی در ریزساختار منطقه HAZ دلیل افزایش انرژی ضربه در حرارت

تشکیل فازهای تعادلی، انرژی ضربه جوش افزایش یافته و در منطقه HAZ با افزایش حرارت ورودی به دلیل رشد دانه‌ها و کاهش اثر قفل شوندگی مرز دانه، انرژی ضربه کاهش یافته است. همچنین بررسی سطح شکست نمونه‌های ضربه نشان داد که در فلزجوش با افزایش حرارت ورودی، شکست از حالت ترد به شکست نرم و در منطقه HAZ شکست از حالت نیمه ترد به شکست ترد تغییر یافته است.

- نتایج حاصل آزمون از کشش نشان داد که با افزایش حرارت ورودی استحکام کششی از 1154 به 965 MPa به دلیل رشد متوسط اندازه دانه‌ها در منطقه HAZ کاهش یافته است.

منابع

- 1-Tomita, Y. 2000. Development of Fracture Toughness of Ultrahigh Strength, Medium Carbon, low Alloy Steels for Aerospace Application. *International. Materials Reviews*. 45. 27-37.
doi: [10.1179/095066000771048791](https://doi.org/10.1179/095066000771048791).
- 2-Sun, M., C. Sun, Y., H. Wang, R., K. 2006. Vibratory stress relieving of welded sheet steels of low alloy high strength steel. *Materials Letters*. 58. 1396-1399.
doi.org/10.1016/j.matlet.2003.10.002
- 3-Torres, M., A., S. Voorwald, H., J., C. 2002. An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel. *International Journal of Fatigue*. 24. 877-886.
[doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00205-5](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00205-5).
- 4- Pirinen, M. Martikainen, Y. Layus, P., D. Karkhin, V., A. Ivanov, S., Y. 2016. Effect of Heat Input on the Mechanical Properties of Welded Joints in High Strength Steels. *Welding International*, 30. 129-132.
- 5-Dong, H. Hao, X. Deng, D. 2014. Effect of Welding Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of HSLA Steel Joint. *Metallography, Microstructure, Analysis, Journal*. 3. 138-146.
- 6- Rizvi, S., A. Ahamad, M. 2018. Effect of Heat Input on the Microstructure and Mechanical Properties of a Welded Joint-A Review, *International Journal of Applied Engineering Research*, 13. 184-188.
- 7- Prasad, K. Dwivedi, D., K. 2008. Microstructure and Tensile Properties of Submerged Arc Welded 1.25 Cr-0.5 Mo Steel Joints. *Materials and Manufacturing Processes*. 23. 463-468.
- 8-Ju, J., B. Kim, W., S. Jang, J., I. 2012. Variations in DBTT and CTOD within Weld Heat-Affected Zone of API X65 Pipeline Steel. *Materials Science and Engineering: A*. 546. 258-262.
- 9- Khlusova, E., I. Orlov, V., V. 2013. Change in the Structure and Properties in the Heat Affected Zone of Welded Joints Made from Low-Carbon Ship Building and Pipe Steels. *Metallurgist*. 56. 684-699.

در حرارت ورودی کم، شکل (11-الف) شکست در منطقه جوش به صورت شکست ترد می‌باشد. سطح شکست ترد، با انرژی ضربه پائین به دلیل وجود ساختار مارتنزیتی می‌باشد. اما در منطقه HAZ شکست به صورت مخلوطی از شکست نرم و ترد می‌باشد. وجود ریزساختار مارتنزیتی با فریت سوزنی در منطقه HAZ عامل این اتفاق است. فرورفتگی‌های فنجان‌ی شکل با گسیختگی گود شده در تصویر شکل (11-ب) مشخص است. بررسی SEM از سطح شکست منطقه جوش در حرارت ورودی زیاد، منطبق با شکل (11-ج)، حفرات کوچک و بزرگ غیریکنواخت به صورت دیمل‌های در سطح شکست را نشان می‌دهد که بیانگر شکست نرم می‌باشد. وجود ترکیبی از ریزساختار بینت و فریت با انرژی ضربه بالا عامل شکست نرم در این نمونه می‌باشد. ولی در منطقه HAZ با حرارت ورودی بالا، شکست ترد از نوع رخ برگی رخ داده است که تصویر آن در شکل (11-د) نشان داده شده است.

5- نتیجه گیری

- در دمای پیش گرم ثابت، با افزایش حرارت ورودی، نرخ سرد شدن در فلزجوش از 333 به 191 درجه سانتی‌گراد بر ثانیه کاهش یافته است. همچنین با افزایش حرارت ورودی، زمان سرد شدن (Δt 8/ 5) از 16/69 به 20/42 ثانیه در منطقه HAZ و از 0/98 به 1/20 ثانیه در فلزجوش افزایش یافته است.
- ریزساختار فلزجوش شامل فازهای مارتنزیت و فریت با مورفولوژی سوزنی می‌باشد. با افزایش حرارت ورودی میزان فاز فریت افزایش یافته و مورفولوژی فریت از سوزنی به چند وجهی تغییر یافته است. ریزساختار منطقه HAZ براساس نرخ سرد شدن شامل فاز مارتنزیت و بینت است. با افزایش حرارت ورودی به دلیل سرعت سرد شدن کمتر علاوه بر ریزساختار بینت و مارتنزیت ریزساختار فریت نیز مشاهده شد.
- کاهش اثر سختی در مناطق جوش و HAZ نمونه‌ها، با افزایش حرارت ورودی را می‌توان به کاهش مارتنزیت، افزایش فازهای تعادلی مانند فریت در ریزساختار و افزایش اندازه دانه نسبت داد.
- با افزایش حرارت ورودی به دلیل کاهش میزان سرمایش و

- Misra, K. 2018. Effect of Heat Input on the Microstructure and Mechanical Properties of Low Alloy Ultra-High Strength Structural Steel Welded Joint. *Steel Research International*. 89.
- 22- Deng, H. Liu, Z. Wang, X. Ma, J. Han, F. Wang, Z. 2022. Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of the simulated coarse-grained heat-affected zone (CGHAZ) of novel twinning-induced plasticity (TWIP) steel. *Materials Today Communications*. 33.
- 23- Belkessa, B. Miroud, D. Ouali, N. Cheniti, B. 2016. Microstructure and Mechanical Behavior in Dissimilar SAF 2205/API X52 Welded Pipes. *Acta Metallurgica Sinica*. 29. 674-682.
- 24-Talas, S. 2010. The assessment of carbon equivalent formulas in predicting the properties of steel weld metals. *Materials & Design*. 31. 2649-2653.
- 25-Metals Handbook. 1983. 9th edition. Welding, Brazing and Soldering, ASM International: Metals Park, OH.
- 26-AWS D17.1. 2010. Specification for Fusion Welding for Aerospace Applications.
- 27-Kou, S. 2002. Welding Metallurgy. Second Edition, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- 28-Kornoka, K. Nematzadeh, F. Mostaan, H. Sadeghian, A., H. Moradi, M. Waugh, D., G. Bodagh, M., I. 2022. Influence of Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of Gas Tungsten Arc Welded HSLA S500MC Steel Joints. *Metals*. 12.
- 29-Tomkow, J. Swierczynska, A. Landowski A Rogalski, G. 2021. Bead-on- plate Underwater Wet Welding on S700 MC Steel. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 15. 288-296.
- 30- Mohandas, T. Reddy, G., M. Kumar, B., S. 1999. Heat-affected zone softening in high-strength low-alloy steels. *Journal of Materials Processing Technology*. 88. 284-294.
- 31- Kirana, D., V. Basub, B. De, A. 2012. Influence of process variables on weld bead quality in two wire tandem submerged arc welding of HSLA steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 212. 2041- 2050.
- 32- Neves, J. Loureiro, A. 2004. Fracture toughness of welds—effect of brittle zones and strength mismatch. *Journal Material Process Technology*. 153-154. 537-543.
- 33-Chennaiah, M., B. Kumar, P., N. Rao, K., P. 2015. Effect of Heat Input and Heat Treatment on the Mechanical Properties of Is2062-Is103 Cr 1Steel Weldments. *International Journal of Advances in Materials Science And Engineering*. 4. 17-24.
- 10-Mendoza, B., I. Maldonado, Z., C. Albitier, H., A. Robles, P., E. 2010. Dissimilar Welding of Superduplex Stainless Steel/HSLA Steel for Offshore Applications Jojnt by GTAW. *Engineering*. 2. 520.
- 11-Balley, N. Coe, F., R. Jenkins, N. Pargeter, R., J. Hart, P., H., M. 1993. Welding steels without hydrogen cracking Second Edition, Abington publishing. ASM International.
- 12-Irving, B. 1995. The challenge of welding heat treatable alloy steels. *welding journal*. 74. 43-48
- 13-Kuma, R., S. Kasyap, P. Pandey, C. Bous, B. Nath, S., K.. 2021. Role of Heat in Puts on Microstructure and Mechanical Properties in Coarse Grained Heat Affected Zone of Bainitic Steel. *CIRP Journal Science and Technology*. 35. 724- 734.
doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.09.002.
- 14-Zhang, J. Xin, W. Ge, Z. Luo, G. Peng, J. 2023. Effect of high heat input welding on the microstructures, precipitates and mechanical properties in the simulated coarse grained heat affected zone of a low carbon Nb-V-Ti-N microalloyed steel. *Materials Characterization*. 199.
doi.org/10.1016/j.matchar.2023.112849.
- 15- Węglowski, M. Zeman, M. 2014. Prevention of cold cracking in ultra-high strength steel Weldox 1300 . *archives of civil and mechanical engineering*. 14. 417 – 424.
- 16-Saxena, A. Kumaraswamy, A. Madhusudhan, Reddy, G. Madhu, V. 2018. Influence of welding consumables on tensile and impact properties of multi-pass SMAW Armox 500T steel joints vis-a-vis base metal. *Defence Technology*. 14. 188-195.
- 17- Mohabat, A. sabet, H. 2016. the effect of SMAW welding input heat on microstructure and mechanical properties VCN200 steel welding area. the 18th National Welding and Inspection Conference and the 7th National Non-Destructive Testing Conference, Arak, Association of Welding and Non-Destructive Testing. Arak Universit.
- 18-Zhou, P. Wang, B. Wang, L. Hu, Y. Zhou, L. 2018. Effect of welding heat input on grain boundary evolution and toughness properties in CGHAZ of X90 pipeline steel. *Materials Science and Engineering A*. 722. 112-121.
- 19- Zheng, Y. Liu, Y. Song, Yliu., J. Kong, K. Liang, Y. 2017. Effect of Welding Heat Input on Microstructure and Softening Behavior of 5CrMoV Steel. *Key Engineering Material.s* 735. 42-48.
- 20-Alkemade, S., J. 1996. The Weld Cracking Susceptibility of High Hardness Armour Steel. *DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory*.
- 21-Wen, CH. Wang, Z. Deng, X. Wang, G. Devesh R.