

بررسی عوامل مختلف بر عمق نفوذ و پهنای جوش آلیاژ تیتانیوم گرید ۵ (Ti-6Al-4V) جوشکاری شده با روش پلاسما

یاسر وحیدشاد^{۱*}، امیرحسین خدابخشی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۱، ش ص: ۴۸-۳۳، تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۲۶)

چکیده

در این تحقیق، تاثیر عوامل مختلف جوشکاری پلاسما بر روی کیفیت جوش ورق ۳ میلی‌متر آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V بررسی شده است. این عوامل شامل شدت جریان الکتریکی، سرعت خطی جوشکاری و ترکیب مختلف گاز پلاسما (آرگون - هلیوم) است که بر پهنای سطح و ریشه جوش (نشان‌دهنده مقدار حرارت ورودی) موثر می‌باشد. نتایج ماکروگرافی نشان می‌دهد که یک محدوده مشخص از شدت جریان الکتریکی و سرعت خطی وجود دارد که در داخل این محدوده نفوذ جوشکاری مناسب بوده و یک منطقه جوش بدون هرگونه عیب داخلی و سطحی و با خواص مکانیکی مطلوب بدست می‌آید. همچنین با محافظت موضعی منطقه جوش شامل سطح دنباله و ریشه جوش با گاز آرگون با خلوص 5N می‌توان از اکسید شدن منطقه جوش و تشکیل اکسید تیتانیوم بر سطح جوش جلوگیری کرد (جوش نقره‌ای رنگ براق). نتایج آزمون مکانیکی نشان می‌دهد که در صورت جوشکاری در داخل محدوده مناسب بدست آمده از عوامل جوشکاری، استحکام کششی فلز جوش نزدیک به فلز پایه می‌باشد. به علت اتوماتیک بودن روش جوشکاری، تکرارپذیری روش جوشکاری پلاسما بسیار مناسب بوده و کیفیت جوش به خوبی قابل کنترل می‌باشد. افزایش مقدار گاز هلیوم، باعث گسترش منطقه جوش و عمق نفوذ بالاتر جوش می‌شود. بررسی ریزساختار منطقه جوش نشان می‌دهد که سه ساختار آلفای محصور شده دندان‌های، ساختار آلفا - بتا (ویدمن اشتاتن) و مارتنزیت در ساختار فلز جوش وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری قوس پلاسما، ریزساختار، آلفای محصور شده، مارتنزیت، آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V.

^۱ - استادیار پژوهشگاه فضایی ایران، پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی، تهران، ایران

^۲ - محقق پژوهشگاه فضایی ایران، پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی، تهران، ایران

*- نویسنده مسئول مقاله: y.vahidshad@isrc.ac.ir

پیشگفتار

تیتانیوم ترکیبی از خواص استحکام بالا، چقرمگی مناسب، چگالی پایین، غیرسمی و مقاومت به خوردگی در دماهای بسیار پایین تا دمای نسبتاً بالا (تا 600°C) است. این خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی مناسب فلز تیتانیوم و آلیاژهای آن، باعث ایجاد جایگاهی ویژه در محصولات فلزی پس از فولاد و آلومینیوم می‌شود. در کنار کاربردهای تیتانیوم در محصولات مصرفی مثل دسته گلف، بدنه دوچرخه و رایانه‌های قابل حمل، مهم‌ترین کاربردهای تیتانیوم به دلیل خواص منحصر بفرز ذکر شده بیش‌تر در صنایع فضایی، هوافضا، صنعت نفت، گاز و پتروشیمی، صنایع خودرو، صنایع دریایی و اندام‌های داخلی بدن می‌باشد. در کاربردهای فضایی انواع مخازن سوخت مایع و جامد با توجه به ویژگی‌های ذکر شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مخازن در سامانه‌های انتقال مداری، سیستم‌های کنترل وضعیت ماهواره و تجهیزات جانبی سازه‌های فضایی استفاده می‌شود (شکل ۱). انواع روش‌های جوشکاری معمول مورد استفاده در ساخت مخازن مورد کاربرد فضایی شامل روش‌های ذوبی^۱ و نیمه‌جامد^۲ می‌باشد [۱-۳]. تیتانیوم خالص در دمای اتاق دارای ساختار بلوری HCP (فاز آلفا) است که در دمای نزدیک 885°C به ساختار بلوری BCC (فاز بتا) تغییر فاز می‌یابد. دمای انتقال بتا، بسته به نوع و مقدار عناصر آلیاژی یا مواد ناخالصی می‌تواند افزایش و یا کاهش یابد. عناصر آلیاژی همچون آلومینیوم، گالیوم، ژرمانیوم، کربن، اکسیژن و نیتروژن به عنوان پایدارکننده‌های فاز آلفا و عناصری همچون مولیبدن، وانادیوم، تانتالیوم، نیوبیوم، آهن، کروم، منگنز، کبالت، نیکل و مس پایدارکننده‌های فاز بتا می‌باشند. آلیاژهای تیتانیوم بر اساس میزان فازهای آلفا و بتای موجود در ساختار خود در دمای اتاق به ۵ دسته اصلی شامل تیتانیوم آلفا، شبه آلفا، آلفا-بتا، شبه بتا و بتا تقسیم‌بندی می‌شوند [۱، ۴]. تیتانیوم خالص تجاری و بیش‌تر آلیاژهای تیتانیوم قابلیت جوشکاری با استفاده از روش‌های مختلف جوشکاری را دارند [۵، ۶]. متداول‌ترین روش‌های جوشکاری مورد استفاده برای آلیاژهای تیتانیوم شامل جوشکاری تنگستن با گاز خنثی [۷-۹]، جوشکاری

قوس پلاسما [۱۰-۱۲]، جوشکاری باریکه الکترونی [۱۳]، جوشکاری باریکه نور لیزر [۱۴، ۱۵] و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [۱۶، ۱۷] اشاره نمود. مذاب تیتانیوم به آسانی با اکسیژن، نیتروژن، کربن و هیدروژن واکنش می‌دهد که این عناصر از طریق تماس با هوا و یا سطح آلوده می‌تواند جذب مذاب تیتانیوم شوند و اثرات نامطلوبی را بر روی خواص فلز جوش داشته باشند. به همین علت فرآیندهای جوشکاری همچون جوش قوس زیرپودری برای جوشکاری تیتانیوم مناسب نیستند. همچنین عمدتاً تیتانیوم را نمی‌توان به فلزات دیگر جوش داد؛ زیرا امکان تشکیل ترکیبات بین فلزی تُرد در ناحیه جوش وجود دارد که می‌تواند سبب ایجاد ترک و شکست تُرد در ناحیه جوش شوند. جوشکاری قوس پلاسما (PAW) توسعه یافته جوشکاری قوس تنگستنی گازی (GTAW) است، به این علت قوس پلاسما از درون افشانکی تنگ‌کننده عبور می‌کند که قوس ایجاد شده باریک‌تر و عمق بیشتری دارد [۱۸]. گاز خنثی عبور داده شده توسط افشانک وظیفه تشکیل پلاسما را دارد و گاز خنثی عبور داده شده بین افشانک و سرامیک وظیفه حفاظت منطقه جوش مشابه با روش تیگ و میگ-مگ دارد. گاز خنثی قوس یا به صورت آرگون خالص و یا ترکیب آرگون-هلیوم استفاده می‌شود [۱۹]. جوشکاری قوس پلاسما با دو حالت فنی، ذوبی^۳ و سوراخ کلیدی^۴ انجام می‌شود. حالت ذوبی مشابه با روش تیگ است که در ضخامت‌های زیر یک میلی‌متر ایجاد می‌شود. حالت سوراخ کلیدی نفوذ عمیق اتصال را برای اتصال‌های با ضخامت بالاتر از یک میلی‌متر در یک پاس فراهم می‌کند. جوش‌های قوس پلاسما گرایش به سوختگی کناره و رویه‌های مُحدب در امتداد لبه‌های فوقانی دارند، مگر این که در جریان جوشکاری فلز پُرکننده اضافه شود یا این که پاس ثانوی به عنوان پاس زینتی به کار برده شود [۲۱].

^۱- Melt-in^۴- Key hole^۱- Fusion^۲- Semi-Solid



شکل ۱- مخازن تیتانیوم Ti-6Al-4V مورد کاربرد در صنایع فضایی

۵ با ضخامت ۳ mm و ابعاد $150 \times 70 \text{ mm}^2$ استفاده شده است. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی ورق مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده است. قبل از فرآیند جوشکاری به منظور از بین بردن لایه‌های اکسیدی و براده‌های فلزی، محل اتصال به وسیله برس سیمی استینلس استیل ۳۱۶، تمیز شد. برای از بین بردن چربی‌ها و آلودگی‌های محیطی، محل اتصال جوش، توسط حلال استون چربی‌زدایی گردید. به دلیل عدم وجود پخ در لبه ورق‌ها و نوع جوشکاری قوس پلاسما، از هیچ‌گونه فلز پرکننده (سیم‌جوش) جوشکاری استفاده نمی‌شود. در این تحقیق از دستگاه جوشکاری پلاسما مدل Microplasma120 با برند تجاری EWM ساخت کشور آلمان برای انجام جوشکاری مورد استفاده قرار گرفت. این دستگاه دارای دو ورودی گاز می‌باشد. یک گاز روزه که باعث ایجاد پلاسما بین تنگستن و نازل مسی می‌شود و دومی گاز محافظ تورچ که از منطقه جوش در مقابل اتمسفر محیط محافظت می‌کند. دستگاه شامل یک تورچ دستی و یک تورچ اتوماتیک با گردنه عمودی می‌باشد که از تورچ اتوماتیک برای جوشکاری نمونه‌ها استفاده شد. تصویر دستگاه به همراه تورچ عمودی در شکل (۲) مشاهده می‌شود. به منظور ثابت نگاه داشتن تورچ در حین جوشکاری در یک ارتفاع و زاویه مشخص از قطعه کار، یک بازو با قابلیت حرکت در ۴ محور مختلف طراحی و ساخته شد. نگه‌دارنده تورچ و اجزاء تورچ پلاسما در

تحقیقات محقق‌های قبلی بر روی عوامل مختلف مانند شدت جریان جوشکاری [۱۱، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴]، سرعت خطی جوشکاری [۱۱، ۲۱، ۲۲، ۲۴، ۲۵]، قطر سوراخ نازل مسی و قطر تنگستن [۲۲]، نوع طراحی اتصال جوش [۱۱، ۱۹] نرخ جریان گاز پلاسما [۲۴، ۲۱] و اثرات فرکانس جوش پالسی میکروپلاسما [۲۶-۲۹] بر روی مقدار اعوجاج، خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ تیتانیوم گرید ۵ بوده است. این بررسی عوامل ذکر شده عمدتاً بر روی ورق‌های نازک و تا ضخامت حداکثر ۱ mm بوده است. بررسی عوامل ذکر شده نشان داده است که حداقل حرارت ورودی به شرط نفوذ کامل برای بدست آوردن خواص مکانیکی بهینه همراه با کم‌ترین اعوجاج مناسب می‌باشد. در این تحقیق اثر عوامل فرآیند جوشکاری قوس پلاسما بر روی آلیاژ Ti-6Al-4V با ضخامت ۳ mm مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق اثر شدت جریان و سرعت خطی جوشکاری و برای اولین بار، ترکیب گاز پلاسما (هلیوم + آرگون) به منظور بدست آوردن یک جوش سالم با کم‌ترین حرارت ورودی به فلز جوش، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی عوامل شدت جریان الکتریکی و سرعت خطی جوشکاری و نیز اثر ترکیب مختلف گاز آرگون-هلیوم در پلاسما، از ورق‌های آلیاژی تیتانیوم گرید

برگشتی در راستای خط جوش و عمود بر خط جوش را دارد. به دلیل اکسید شدن فلز تیتانیوم در دماهای بالاتر از 500°C ، معمولاً فرآیند جوشکاری این آلیاژها باید در شرایط اتمسفر خنثی و یا کاملاً خلاء انجام شود. از این رو برای انجام فرآیند جوشکاری، ساخت تجهیزات حفاظت سطح و ریشه جوش توسط گاز آرگون به شدت الزامی می‌باشد؛ زیرا اکسید شدن سطح و ریشه جوش علاوه بر کاهش انعطاف‌پذیری منطقه اتصال، احتمال تشکیل عیوبی مانند تخلخل را نیز افزایش می‌دهد.

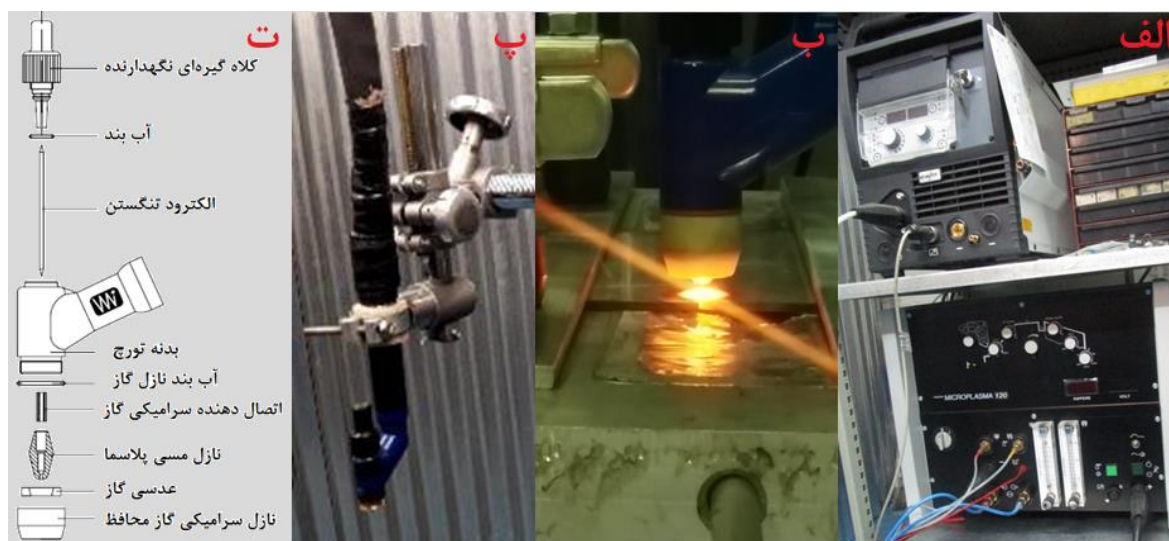
شکل (۲) مشاهده می‌شود. به منظور اطمینان از دقیق بودن سرعت خطی جوشکاری که بر حرارت ورودی و ابعاد جوش تاثیر فراوانی دارد، با توجه به ثابت بودن تورچ جوشکاری، ورق‌ها توسط یک میز با سرعت خطی قابل تنظیم از زیر تورچ عبور داده می‌شود که سرعت فرآیند در طی شروع تا پایان جوشکاری ثابت بوده و تکرارپذیری فرآیند به صورت چشمگیری بهبود می‌یابد. همان‌گونه که در تصویر شکل (۳) دیده می‌شود، این سیستم شامل یک میز صلیبی با قابلیت حرکت در دو محور به همراه یک الکتروموتور و کنترلر می‌باشد و قابلیت حرکت رفت و

جدول ۱- ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلیاژ تیتانیوم گرید ۵ مورد استفاده در این تحقیق

Ti	Al	V	Fe	Cu
تیتانیوم گرید ۵				
پایه	۶	۴/۵	۰/۰۵	۰/۰۲
درصد ازدیاد طول (%)	استحکام کششی (MPa)		استحکام تسلیم (MPa)	
۱۵	۹۰۳		۸۵۴	

جدول ۲- عوامل ثابت در جوشکاری ورق‌های ۲mm آلیاژ گرید ۵ تیتانیوم

پارامتر	واحد	مقدار	پارامتر	واحد	مقدار
گاز پلاسما (آرگون - هلیوم)	درصد حجمی	۷۵-۲۵٪	دبی گاز روزنه پلاسما	mLit/min	۰/۸
		۶۰-۴۰٪	دبی گاز روزنه	Lit/min	۱۰
گاز محافظ آرگون	درصد حجمی	۱۰۰٪	دبی گاز محافظ ریشه	Lit/min	۲۰
قطر نازل پلاسما	mm	۳	دبی گاز محافظ دنباله	Lit/min	۳۰
الکتروود	درصد وزنی	تنگستن-۲٪ توریم	موقعیت جوشکارس	1G	تخت
قطر تنگستن	mm	۱	نوع اتصال جوش	Butt weld	لب به لب



شکل ۲- الف) تصویر دستگاه جوشکاری پلاسما، ب) تصویر تورچ جوشکاری پلاسما، پ) نگهدارنده تورچ (ت) اجزاء تورچ پلاسما

جوش می‌شود که نقش مهمی در ضریب اطمینان مخازن و سازه‌های فضایی دارد. جهت بررسی خواص مکانیکی از ورق‌های جوشکاری شده نمونه کشش مطابق با استاندارد ASTM E8M-04 آماده شده است. ریزساختار منطقه جوش و پایه توسط میکروسکوپ نوری (Leica DM 4000 M) و محلول کرول (۱۰۰ cc آب مقطر، ۵ cc اسید نیتریک و ۲ cc اسید فلئوئوریدریک) اچ شده است. در این مرحله نمونه‌ها با کاغذ سنباده سیلیکون کاربید ۱۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ و نیز پارچه نمدی همراه با سوسپانسیون پودر آلومینا صیقل شده و سپس به مدت ۶ تا ۸ ثانیه در محلول اچ قرار می‌گیرد. دیگر عوامل اندازه روزنه نازل پلاسما و قطر تنگستن نیز در تغییر این نمودار موثر خواهند بود؛ ولی تمام موارد نام برده ثابت نگه داشته شدند. عوامل ثابت در نظر گرفته شده برای این نمونه‌ها در جدول (۲) آمده است.

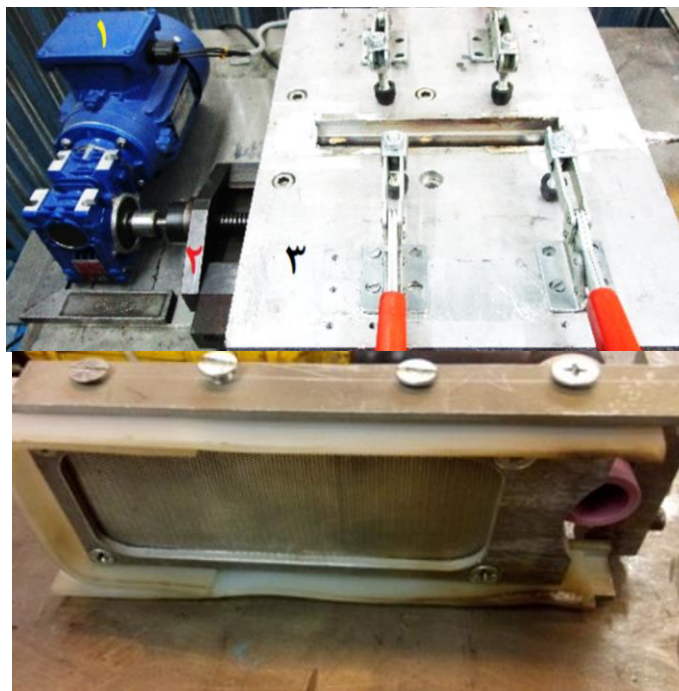
شکل (۳) تجهیزات محافظت منطقه جوش را نمایش می‌دهد. این ابزار به منظور محافظت از منطقه جوش بعد از انجماد در قسمت روی خط جوش (دنباله) و همچنین محافظت از ریشه جوش پس از انجماد مذاب تا زمان سرد شدن تا کم‌تر از دمای 500°C ، ساخته شده است.

در جدول (۳) کد نمونه‌ها و شدت جریان و سرعت خطی جوشکاری ورق‌های ۳ میلی‌متر مشاهده می‌شود. همان‌گونه که روند تغییرات طراحی شده برای فرآیند آزمایش نشان می‌دهد تنها متغیر این نمونه‌ها سرعت خطی و شدت جریان جوشکاری و ترکیب شیمیایی گاز پلاسما می‌باشد. به طور کلی هدف از انتخاب این متغیرها تعیین محدوده‌ای از سرعت خطی و شدت جریان و گاز پلاسما می‌باشد که در این محدوده اتصالی مناسب با ظاهر جوش سالم ایجاد شود.

محدوده مناسب جوش با کم‌ترین حرارت ورودی، باعث کاهش تنش پسماند و افت خواص مکانیکی منطقه

جدول ۳- مقادیر خواص مکانیکی و حرارت ورودی و اندازه مناطق جوشکاری قوس پلاسما

نمونه	ترکیب گاز پلاسما درصد حجمی	سرعت خطی جوشکاری mm/min	شدت جریان A	عرض ریشه جوش mm	طول منطقه تحت تاثیر حرارت mm	حرارت ورودی J/mm
۱	۲۵He-۷۵Ar	۴۸	۸۰	۴	۲۰/۵	۱۰۸۰
۲	۲۵He-۷۵Ar	۴۸	۹۰	۹/۲	۲۵	۱۲۱۵
۳	۲۵He-۷۵Ar	۴۸	۱۰۰	۱۲/۲	۲۷/۵	۱۳۵۰
۵	۲۵He-۷۵Ar	۷۰	۸۰	عدم نفوذ	عدم نفوذ	۷۴۱
۶	۲۵He-۷۵Ar	۷۰	۹۰	عدم نفوذ	عدم نفوذ	۸۳۳
۷	۲۵He-۷۵Ar	۷۰	۱۰۰	۱۱/۵	۲۶	۹۲۶
۸	۲۵He-۷۵Ar	۷۰	۱۰۵	۱۲/۸	۲۷/۵	۹۷۲
۹	۲۵He-۷۵Ar	۸۱	۹۰	عدم نفوذ	عدم نفوذ	۷۲۰
۱۰	۲۵He-۷۵Ar	۸۱	۱۰۰	عدم نفوذ	عدم نفوذ	۸۱۰
۱۱	۲۵He-۷۵Ar	۸۱	۱۰۵	۱۰	۲۴	۸۵۰
۱۲	۲۵He-۷۵Ar	۸۱	۱۱۰	۱۲/۵	۲۶	۸۹۱
۱۳	۴۰He-۶۰Ar	۴۸	۸۰	۷	۲۱/۹	۱۰۸۰
۱۴	۴۰He-۶۰Ar	۴۸	۹۰	۹/۷	۲۶/۳	۱۲۱۵
۱۵	۴۰He-۶۰Ar	۴۸	۱۰۰	۱۳/۵	۲۸/۶	۱۳۵۰
۱۶	۴۰He-۶۰Ar	۷۰	۸۰	عدم نفوذ	عدم نفوذ	۷۴۱
۱۷	۴۰He-۶۰Ar	۷۰	۹۰	۶	۲۰	۸۳۳
۱۸	۴۰He-۶۰Ar	۷۰	۱۰۰	۱۲	۲۶/۵	۹۲۶
۱۹	۴۰He-۶۰Ar	۷۰	۱۰۵	۱۳/۸	۲۸/۹	۹۷۲
۲۰	۴۰He-۶۰Ar	۸۱	۱۰۰	۸/۳	۲۵/۷	۸۱۰
۲۱	۴۰He-۶۰Ar	۸۱	۱۰۵	۱۰/۵	۲۵	۸۵۰
۲۲	۴۰He-۶۰Ar	۸۱	۱۱۰	۱۳/۲	۲۶/۷	۸۹۱



شکل ۳- میز ساخته شده برای رسیدن به سرعت خطی مشخص (۱ و ۲) تجهیز محافظ ریشه جوش (۳) و سطح روی جوش (۴)

نتایج و بحث

نتایج حاصل از بررسی‌های ریزساختاری، ابعاد منطقه ذوب، ابعاد منطقه متأثر از حرارت و خواص مکانیکی برای یک جوش بهینه از لحاظ خواص و عیوب جوشکاری در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. از نتایج مهم بدست آمده در این قسمت می‌توان به تعیین محدوده شدت جریان و سرعت خطی مناسب برای جوشکاری اشاره کرد. این محدوده از طریق آزمون‌های تجربی تعیین گردید و نتایج حاصل از این آزمون‌های تجربی با یک نمودار برای ورق‌های با ضخامت ۳ mm از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V نمایش داده شده است. درحقیقت این نمودار نشان‌دهنده سرعت خطی و شدت جریان‌هایی می‌باشد که با استفاده از این عوامل متغیر، می‌توان یک جوش مناسب از لحاظ خواص مکانیکی و بدون عیب بودن، پیش‌بینی کرد. در صورت استفاده از گاز آرگون خالص و در حداکثر شدت جریان دستگاه، نفوذ جوش کامل نبوده و یا در سرعت خطی خیلی پایین به صورت مرزی نفوذ کرده و قابل اطمینان نمی‌باشد. لذا برای رفع این عیب از ترکیب گاز آرگون و هلیوم برای بدست آوردن عمق نفوذ بیشتر، استفاده شده است.

جوشکاری ورق‌های ۳ میلی‌متر در نسبت گاز پلاسمای

۶۰-۴۰٪Ar-He و ۷۵-۲۵٪Ar-He

نتایج حاصل از بررسی شدت جریان جوشکاری، سرعت خطی و ترکیب گاز پلاسمای در جدول (۳) و شکل-های ۳ تا ۵ مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، در یک سرعت ثابت و با ترکیب گاز پلاسمای Ar-He با نسبت ۲۵-۷۵٪، با افزایش شدت جریان، اندازه عرض ریشه و سطح روی محل اتصال افزایش می‌یابد. این افزایش اندازه منطقه جوش به علت افزایش حرارت ورودی ناشی از افزایش شدت جریان الکتریکی قوس جوشکاری و بزرگ‌تر شدن حوضچه جوشکاری است (شکل (۴) تا شکل (۶)). همچنین در شدت جریان الکتریکی قوس پلاسمای ثابت، هنگامی که سرعت خطی جوشکاری کاهش می‌یابد، حرارت ورودی افزایش یافته و ذوب بیشتری در لبه‌های اتصال تشکیل شده و عرض منطقه جوش افزایش می‌یابد. این شرایط هم برای ترکیب گاز پلاسمای Ar-He با نسبت ۴۰-۶۰٪ نیز مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که برای افزایش عمق نفوذ یا نیاز به افزایش شدت جریان الکتریکی است و یا نیاز به کاهش سرعت خطی جوشکاری می‌باشد که این عوامل باعث افزایش حرارت ورودی به

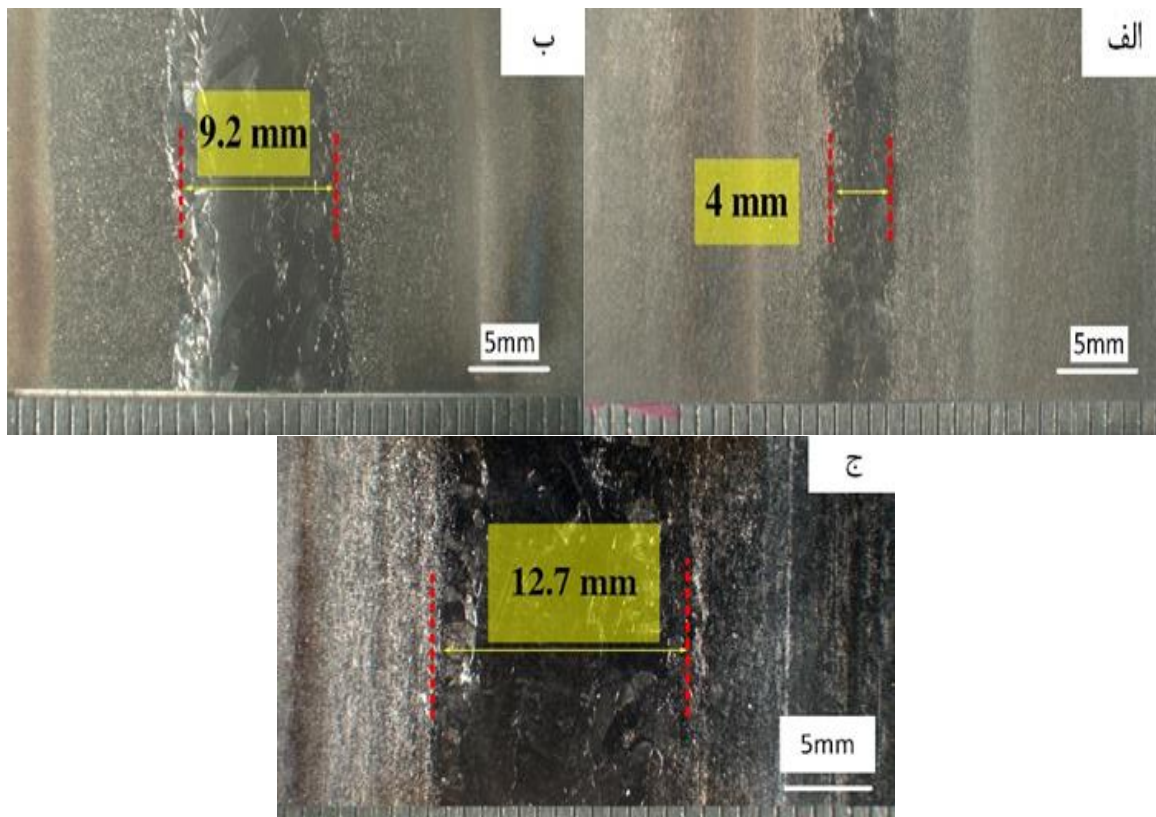
$$\frac{ASME/}{AWS\ Heat\ input(KJ/mm)} = \frac{Arc\ Voltage \times Arc\ current}{Travel\ speed} \quad (2)$$

در روش اروپایی محاسبه حرارت ورودی، مقدار بازدهی حرارت برای روش قوس پلاسما ۰.۶ است. با توجه به موارد ذکر شده حرارت ورودی برای عوامل جوشکاری قوس پلاسما با توجه به استاندارد اروپایی اندازه‌گیری شده و در جدول (۳) آورده شده است. اگر از پهنای جوش به عنوان یک نشانه از حرارت ورودی واقعی (و نه محاسباتی) به قطعه جوشکاری شده استفاده کنیم، در بررسی نتایج حرارت ورودی محاسبه شده در قطعات جوشکاری شده و پهنای جوش (به عنوان یک نشانه از حرارت ورودی واقعی)، تناقض وجود دارد.

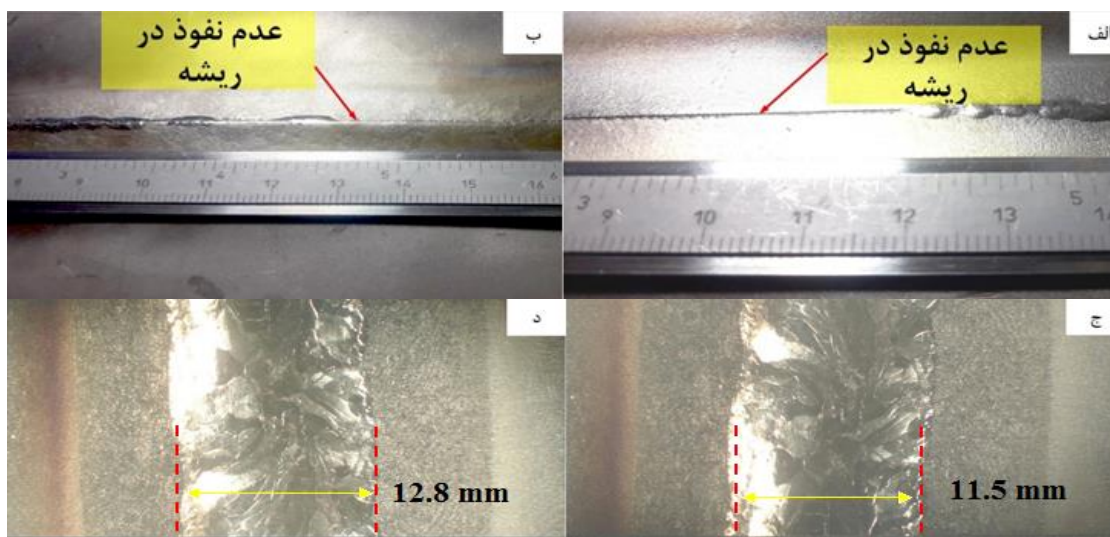
منطقه جوش و افزایش نفوذ و پهنای جوش می‌شود. مقدار انرژی وارد شده به منطقه جوشکاری (حرارت ورودی) یک عامل تعیین کننده برای هر فرآیند جوشکاری می‌باشد که برای اطمینان از کیفیت جوش باید مورد بررسی قرار گیرد. چندین روش برای محاسبه حرارت ورودی به منطقه جوش وجود دارد.

رایج‌ترین روش محاسبه حرارت ورودی استفاده از جریان الکتریکی جوشکاری، ولتاژ و سرعت خطی می‌باشد. بین روش‌های محاسبه آمریکایی (ASME و AWS) و اروپایی (EN-ISO و DIN-ISO) تفاوتی وجود دارد که در روش اروپایی از عامل اضافی بازدهی حرارتی / بهره‌وری فرآیند / بازده قوس استفاده می‌شود [۳۰، ۳۱]:

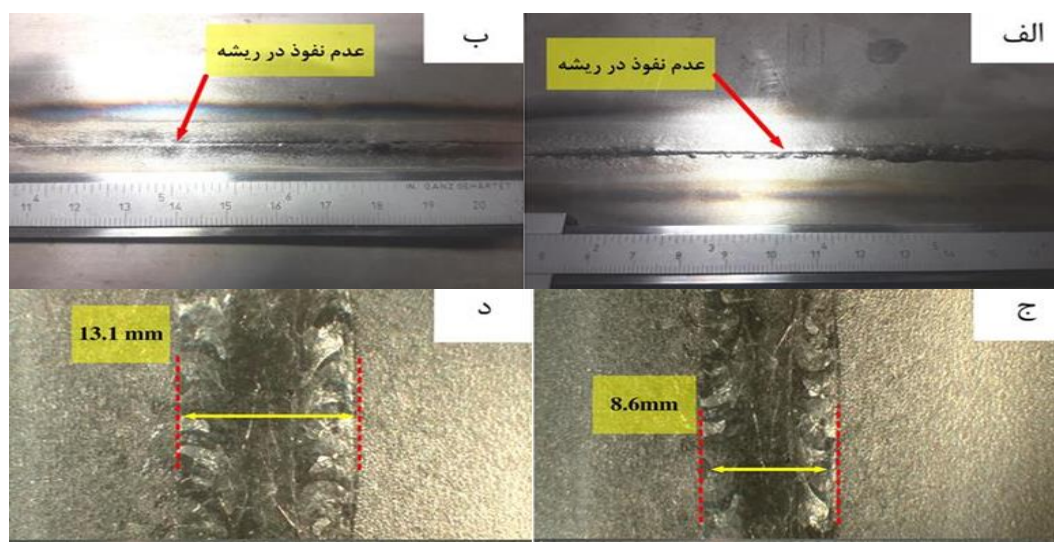
$$\frac{EN/}{ISO\ Heat\ input(KJ/mm)} = \frac{Arc\ Voltage \times Arc\ current \times Thermal\ efficiency}{Travel\ speed} \quad (1)$$



شکل ۴- تصاویر ماکروگرافی از ریشه جوش نمونه‌های جوشکاری شده با روش قوس پلاسما (گاز پلاسما ۷۵-۲۵) با سرعت خطی ۴۸ میلی‌متر بر ثانیه و شدت جریان (الف) ۸۰، (ب) ۹۰ و (د) ۱۰۰ آمپر



شکل ۵- تصاویر ماکروگرافی از ریشه جوش نمونه‌های جوشکاری شده با روش قوس پلاسما (گاز پلاسما ۲۵-۷۵) با سرعت خطی ۷۰ میلی‌متر بر ثانیه و شدت جریان (الف) ۸۰، (ب) ۹۰، (ج) ۱۰۰ و (د) ۱۰۵ آمپر



شکل ۶- تصاویر ماکروگرافی از ریشه جوش نمونه‌های جوشکاری شده با روش قوس پلاسما (گاز پلاسما ۲۵-۷۵) با سرعت خطی ۸۱ میلی‌متر بر ثانیه و شدت جریان (الف) ۱۰۰، (ب) ۱۰۵ و (د) ۱۱۰ آمپر

در حقیقت می‌توان گفت که رابطه ذکر شده در معادلات ۱ و ۲، کامل نمی‌باشد و ضریب تاثیر جریان الکتریکی و سرعت خطی اگرچه در معادلات حرارت ورودی برابر ذکر شده است؛ ولی در واقعیت برابر نمی‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده به نظر می‌رسد، ضریب اثر جریان الکتریکی بزرگ‌تر از تاثیر سرعت خطی جوشکاری باشد. به عنوان مثال برای نمونه ۱۲ با حرارت ورودی محاسبه شده ۸۹۱ J/mm پهنای ریشه جوش

۱۳/۲ mm است؛ اما در نمونه ۳ که از لحاظ اندازه ریشه جوش تقریباً مشابه نمونه ۱۲ (ریشه جوش ۱۲/۲ mm) است، مقدار حرارت ورودی محاسبه شده از رابطه ۱ و ۲ بیش از ۱/۵ برابر نمونه ۱۲ می‌باشد.

جدول (۳) مشخصات عرض ریشه جوش با توجه به سرعت خطی و شدت جریان قوس برای جوشکاری با گاز پلاسمای Ar-He با نسبت ۴۰-۶۰٪ را نیز نشان می‌دهد. همانند قبل نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شدت

سمت پایین و سمت چپ نمودار منتقل می‌کند؛ یعنی اگر جوشکاری با شدت جریان الکتریکی و سرعت خطی مشخصی در گاز پلاسمای آرگون خالص، باعث نفوذ کامل نشود با همان شرایط ولی در مقادیر گاز هلیوم بیش‌تر نسبت به گاز آرگون در گاز پلاسمای، باعث نفوذ کامل جوش می‌شود.

بررسی ریزساختار منطقه جوش و منطقه تحت تاثیر حرارت بر اساس حرارت ورودی

خواص مکانیکی ساختار جوش در آلیاژهای تیتانیوم، وابسته به خواص ساختاری منطقه جوش و منطقه تحت تاثیر حرارت جوش می‌باشد که به نوبه خود به حرارت ورودی، دوره‌های حرارتی در طی جوشکاری و عملیات حرارتی پس از جوش وابسته است. در اصل ریزساختار منطقه جوش و منطقه تحت تاثیر حرارت جوش نقش حیاتی در خواص مکانیکی قطعات جوشکاری شده دارد که مقدار حرارت ورودی، دوره‌های حرارتی و انتقال حرارت (نرخ سرد شدن) حین جوشکاری از مهم‌ترین عوامل موثر در تعیین نوع این ریزساختار است. به دلیل اینکه خواص مکانیکی جوش به خصوص انعطاف‌پذیری با درشت‌تر شدن اندازه دانه‌های اولیه، کاهش می‌یابد. بنابراین مهم است که ساختار ریزدانه‌تر تا حد امکان به وسیله حداقل انرژی ورودی جوشکاری حفظ شود تا از آفت بیش‌تر خواص مکانیکی جلوگیری کنیم. علاوه بر حرارت ورودی، انتقال حرارت قطعه جوشکاری شده نیز می‌تواند تاثیر بالایی بر ریزساختار منطقه جوش و منطقه تحت تاثیر حرارت داشته باشد. به عنوان مثال انتقال حرارت بالا، باعث ایجاد نرخ سرد شدن سریع منطقه جوش و منطقه تحت تاثیر حرارت شده و در نتیجه اندازه ذرات و فاصله تیغه‌های فازهای آلفا و بتا و یا کلونی‌های آلفا را در آلیاژ Ti-6Al-4V، کوچک‌تر می‌کند. در هنگام سرد شدن منطقه جوش و اطراف آن از دمای تبدیل بتا به دماهای پایین‌تر، فاز بتا مکعبی مرکزدار (BCC)، به فاز شش‌وجهی فشرده (HCP) تبدیل می‌شود. خصوصیات این ریزساختار بتای تبدیل یافته به طور اساسی به نرخ سردکردن از بالای دمای تبدیل بتا وابسته است که متقابلاً تحت تاثیر روش جوشکاری، شرایط جوشکاری و دیگر وضعیت‌های جوشکاری (نظیر شکل هندسی قطعه و

جریان الکتریکی قوس یا با کاهش سرعت خطی، حرارت ورودی افزایش یافته و در نتیجه پهنای جوش بزرگ‌تر می‌شود. شکل (۷) نمودار حاصل از بررسی‌های تجربی صورت گرفته از ابعاد ظاهری منطقه اتصال حاصل از جوشکاری با سرعت‌های خطی و شدت جریان‌های مختلف می‌باشد. این نمودار از ۴ منطقه مختلف تشکیل شده است. هر قسمت نشان‌دهنده مجموعه‌ای از عوامل جوشکاری می‌باشد. هر مجموعه با یک رنگ خاص مشخص شده است که هر رنگ نشان‌دهنده وضعیت ظاهری خط جوش می‌باشد. به عنوان مثال رنگ زرد نشان‌دهنده مجموعه‌ای از عوامل جوشکاری می‌باشد که پس از انجام جوشکاری با این عوامل، احتمال ایجاد عیوبی مانند عدم نفوذ در ریشه بسیار زیاد است. رنگ سبز عواملی می‌باشد که با استفاده از آن‌ها می‌توان یک منطقه اتصال بدون عیب جوشکاری ایجاد کرد. استفاده از عوامل مشخص شده با رنگ نارنجی منجر به ایجاد تقعر در روی جوش (گرده جوش) و یا تحذب بیش از حد ریشه جوش می‌شود که به آن حالت مرزی می‌گوییم. در نهایت استفاده از عوامل مشخص شده با رنگ قرمز احتمال ایجاد حفره و سوراخ شدن قطعه بسیار زیاد می‌باشد. لازم به ذکر است، نمودار شکل (۶) فقط برای جوشکاری مقطعی با ضخامت ۳ mm از جنس آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V صادق است.

این رویه در نمونه‌های جوشکاری شده با ترکیب گاز He-Ar با نسبت ۶۰-۴۰ نیز مشاهده می‌شود. به عنوان مثال نمونه شماره ۱۵ با عرض ریشه ۱۳/۵ mm، حرارت ورودی ۱/۳۸ برابر نمونه شماره ۱۹ با عرض ریشه ۱۳/۸ mm دارد. همچنین در بررسی اثر گاز هلیوم در میزان حرارت ورودی واقعی، مشاهده می‌شود که با افزایش گاز هلیوم مقدار حرارت ورودی در شرایط برابر شدت جریان الکتریکی و سرعت خطی ثابت، مقداری بیش‌تر می‌شود و یا در نمونه‌های ۶ و ۱۰ که در ترکیب گاز هلیوم-آرگون با نسبت ۷۵-۲۵ نفوذ صورت نگرفته است. در جوشکاری با گاز هلیوم-آرگون ۴۰-۶۰ نفوذ به خوبی انجام شده است. نتایج حاصل از جدول (۳) و شکل (۶) نشان می‌دهد که افزایش درصد گاز هلیوم در ترکیب گاز پلاسمای، باعث پهن‌تر شدن منطقه جوش با نفوذ کامل (منطقه با رنگ سبز) شده و همچنین این منطقه را به

اندازه دانه‌ها در مناطق تحت تاثیر حرارت نزدیک به فلز پایه است. شکل (۹) ریزساختار فلز پایه آلیاژ تیتانیوم مورد جوشکاری را نشان می‌دهد. این آلیاژ در حالت عملیات آنیل شده است. ریزساختار مورد نظر متشکل از زمینه آلفا و دانه‌های هم‌محور آلفا همراه با بتای بین دانه-ای (تبلور مجدد یافته بعد از نورد) می‌باشد. مرز بین دانه-های آلفا-آلفا قابل تشخیص نمی‌باشد. شکل (۱۰) تصویر ریزساختار فلز جوش آلیاژ تیتانیوم مورد جوشکاری پلازما را نشان می‌دهد. ساختار متشکل از فاز مارتنزیت (تیغه‌های نازک داخل همدیگر)، فاز آلفای محصور شده (Serrated) یا اصطلاحاً دندانه آر‌های و بتای بین دانه‌ای می‌باشد. ریزساختار به دلیل سرد شدن از نقطه ذوب و بالاتر بودن دما نسبت به دمای تبدیل بتا، تماماً شامل ساختار آلفا و بتای تبدیل شده می‌باشند. این ریزساختار به دلیل سرعت سرد شدن زیاد، مکانیزم تبدیل بتا به آلفا به صورت برشی انجام شده و در نتیجه ساختار سوزنی مارتنزیت بدست می‌آید و در محدوده‌هایی که سرعت سرد شدن نسبتاً کم‌تر بوده و نفوذ کنترل کننده تبدیل بتا به آلفا است، ساختار آلفای محصور شده یا آر‌های بدست می‌آید. سرعت سرد شدن زیاد، در فلز جوش به دلیل تماس ورق‌های جوشکاری شده با میز آلومینیومی جوشکاری است که باعث انتقال حرارت بالای ورق به میز می‌شود. در بزرگنمایی ۱۰۰، مرز دانه‌های بتای اولیه مشاهده می‌شود که در مرحله انجماد منطقه جوش تشکیل شده است و بعد از عبور از دمای تبدیل بتا به آلفا این مرزها باقی مانده‌اند.

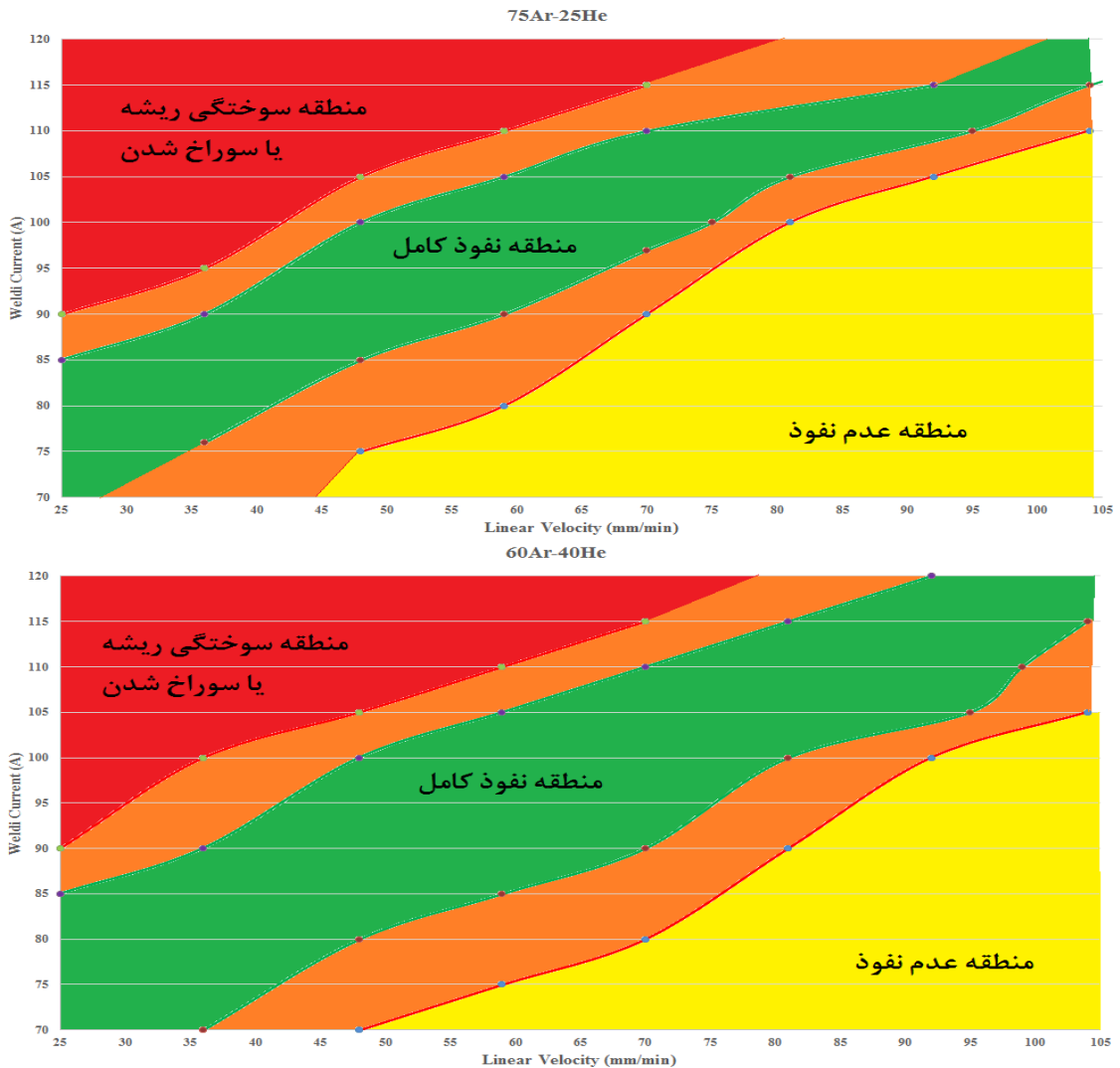
شکل (۱۱) تصویر ریزساختار منطقه تحت تاثیر حرارت نزدیک به فلز پایه آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V جوشکاری شده با روش پلازما را نشان می‌دهد. ساختار متشکل از مارتنزیت و فاز آلفای محصور شده (دندانه آر‌های) و بتای بین دانه‌ای می‌باشد. همچنین در ریزساختار مقداری از ساختار آلفا و بتای اولیه قابل مشاهده است. وجود فاز آلفای اولیه در ریزساختار منطقه تحت تاثیر حرارت نزدیک به فلز پایه به دلیل عدم عبور دمای این ناحیه از دمای تبدیل بتا می‌باشد. دراصل دمای این ناحیه بین دمای محیط و دمای تبدیل بتا می‌باشد. وجود فاز مارتنزیت می‌تواند به دلیل سریع سرد شدن این ناحیه از دمای نزدیک به دمای تبدیل بتا تا دمای محیط باشد که

فیکسچرها) است. در نرخ‌های سرد شدن پایین، به عنوان مثال در روش جوشکاری قوس تنگستن با گاز خنثی یا پلازما (۱۰-۱۰۰ °C/s)، یک ساختار درشت آلفای ویدمن‌اشتاتن همراه با بتای باقی مانده یا مخلوطی از این ساختار و آلفای اولیه تشکیل می‌شود که استحکام تسلیم و نهایی بهتر و انعطاف‌پذیری و چقرمگی کمتری نسبت به فلز پایه نورد شده آنیل شده، مشاهده می‌شود. رشد دانه-های آلفا و بتا در منطقه تحت تاثیر حرارت نزدیک جوش، درست در مجاورت خط منطقه ذوب شده جوش، اتفاق می‌افتد که محدوده حداکثر دمای مابین پایین دمای انجماد تا بالا دمای تبدیل بتا (تقریباً ۹۹۵ °C برای آلیاژ Ti-6Al-4V) می‌باشد. بطوری که اگر حرارت ورودی (انرژی ورودی) بیش‌تر باشد، باعث درشت‌تر شدن دانه-های منطقه جوش و منطقه تحت تاثیر حرارت جوش می‌شود. همچنین حرارت ورودی بیش‌تر، باعث گسترش پهنای منطقه جوش و منطقه تحت تاثیر حرارت می‌شود که تقریباً از عدم مشاهده این ناحیه تحت تاثیر حرارت در روش جوشکاری باریکه الکترونی و باریکه لیزر تا مقدار چندین برابر اندازه دانه بتا در جوشکاری تنگستن با گاز خنثی، می‌تواند پهنای داشته باشد. منطقه تحت تاثیر حرارت نزدیک فلز پایه تا دمایی کم‌تر از دمای تبدیل بتا مواجه می‌شود. حضور حتی مقدار کمی از فاز آلفا در دمای حداکثر در دوره‌های حرارتی جوشکاری، برای جلوگیری از رشد اندازه دانه بتا کافی می‌باشد. بنابراین حضور فاز آلفا، برای بهبود انعطاف‌پذیری این ناحیه در مقایسه با منطقه ذوب دانه درشت و منطقه تحت تاثیر حرارت نزدیک، مهم است. در وضعیت جریان حرارتی دوبعدی نظیر روش‌های جوشکاری نفوذ کامل پلازما (PAW)، انجماد دانه‌ها به شکل ستونی از داخل فلز پایه در جهت تقریباً موازی با ورق یا سطح ورق انجام می‌شود تا در نهایت با تشکیل مرز دانه عمود در خط مرکز جوش برخورد کنند [۲۴-۱۰].

شکل (۸) تصویر ماکروگرافی نمونه‌های جوشکاری شده شماره ۱۳ و ۱۷ می‌باشد که به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین حرارت ورودی محاسبه شده را دارد؛ ولی همان‌گونه که مشاهده می‌شود، اندازه پهنای جوش و مناطق تحت تاثیر حرارت تفاوت زیادی ندارند. اندازه دانه‌ها در مناطق تحت تاثیر حرارت نزدیک به جوش، درشت‌تر از

بالتر از دمای تبدیل بتا دارد و در نتیجه فاز آلفای اولیه باقی نمی‌ماند. همچنین به علت دمای بالاتر این ناحیه، شیب کاهش دما شدیدتر بوده و مقدار تشکیل فاز مارتنزیت بیشتر می‌شود.

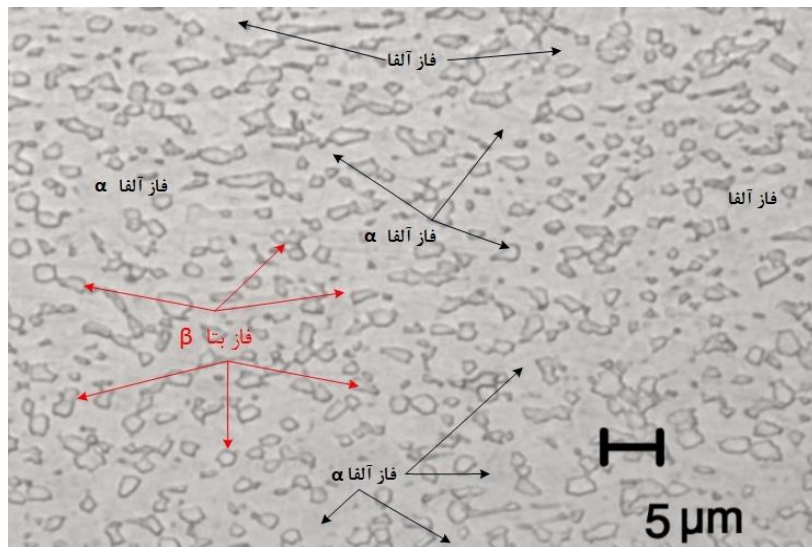
منجر به تشکیل فاز فوق‌ساختار مارتنزیت می‌شود. ریزساختار در منطقه تحت تاثیر حرارت نزدیک به جوش کمی با منطقه تحت تاثیر نزدیک به فلز پایه متفاوت است. در این منطقه مقدار فاز مارتنزیت بیشتر بوده و اثری از فاز آلفای اولیه مشاهده نمی‌شود. این ناحیه دمای



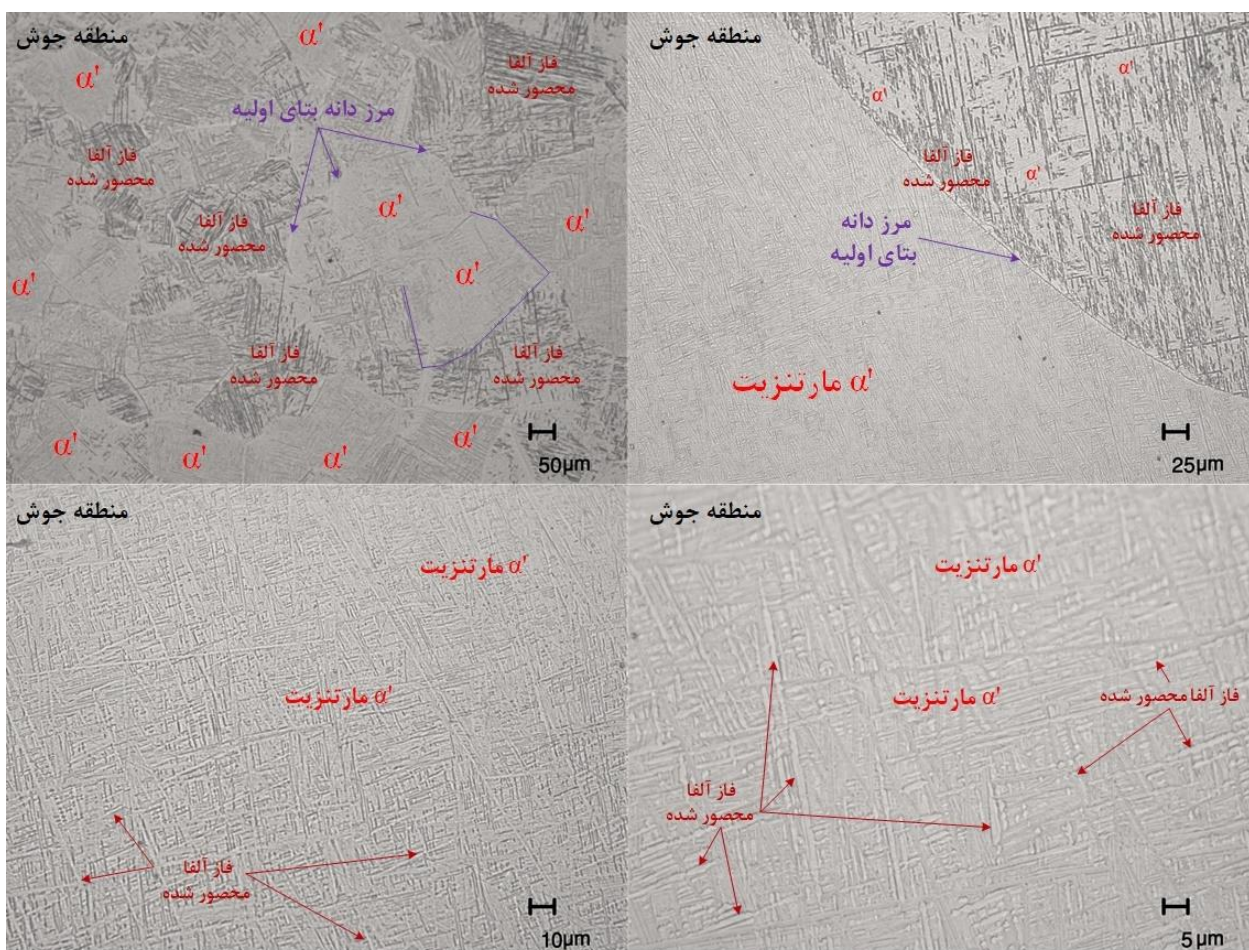
شکل ۷- نمودار تجربی پارامترهای مناسب برای جوشکاری ورق‌های تیتانیوم با ضخامت ۳mm



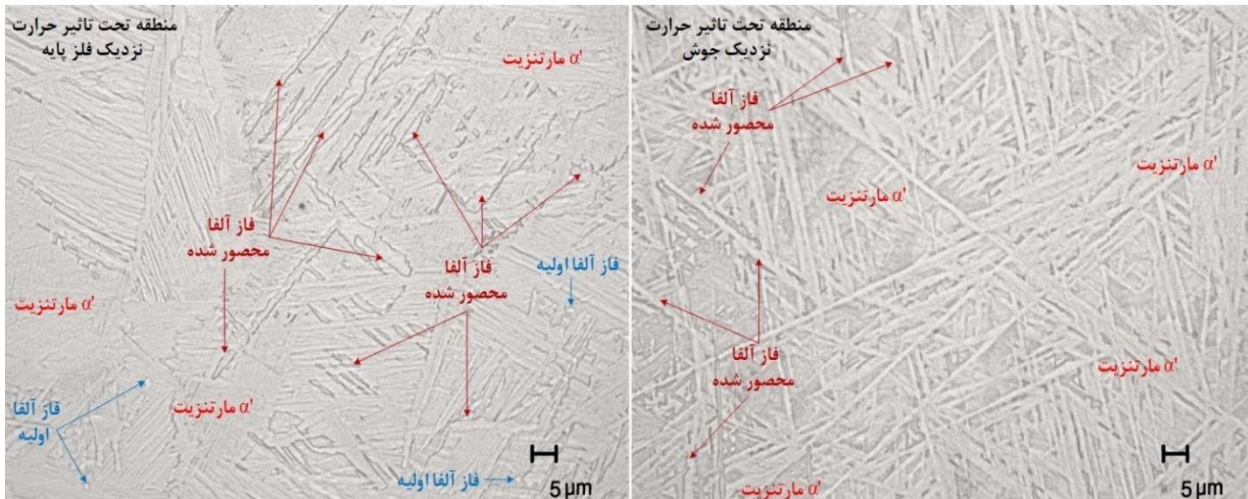
شکل ۸- تصویر ماکرو سطح مقطع نمونه شماره ۱۳ و ۱۷ جوشکاری شده با روش پلاسما



شکل ۹- ریزساختار فلز پایه آلیاژ تیتانیوم استفاده شده در این تحقیق، ریزساختار شامل زمینه آلفا (روشن)، دانه‌های آلفا (روشن) و بتای بین‌دانه‌ای (تیره) است



شکل ۱۰- ریزساختار فلز جوش آلیاژ تیتانیوم جوشکاری شده با روش قوس پلاسما برای نمونه‌های شماره با بزرگنمایی‌های ۱۰۰×، ۲۰۰×، ۵۰۰× و ۱۰۰۰×. ریزساختار شامل مارتنزیت (تیغه‌ای)، آلفا محصور شده و آرهای (روشن) و بتای بین‌دانه‌ای (تیره) است



شکل ۱۱- ریزساختار منطقه تحت تاثیر حرارت نزدیک به جوش و نزدیک به فلز پایه آلیاژ تیتانیوم جوشکاری شده با روش قوس پلاسما برای نمونه‌های شماره با بزرگنمایی‌های $100\times$ ، $200\times$ ، $500\times$ و $1000\times$. ریزساختار شامل مارتنزیت (تیغه‌ای)، آلفا محصور شده و آره‌ای (روشن) و بتا بین‌دانه‌ای (تیره) است

محدوده (محدوده سبز رنگ در شکل ۷) می‌توان به یک جوش نفوذ کامل و عاری از عیب و بدون اکسید شدن دست یافت. در این محدوده هرچه شدت جریان الکتریکی کم‌تر و سرعت خطی بیش‌تر باشد، حرارت ورودی کم‌تر شده و در نتیجه عرض منطقه جوش کوچک‌تر می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که تاثیر جریان الکتریکی در حرارت ورودی بیش‌تر از سرعت خطی می‌باشد (با وجود ضریب یکسان در معادله حرارت ورودی). همچنین خط جوش‌های جوشکاری شده در این محدوده کاملاً در برابر اکسیداسیون محافظت شده و یک جوش نقره‌ای براق که نشان دهنده عدم اکسید شدن حوضچه و منطقه تحت تاثیر حرارت است، مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، استفاده از گاز پلاسما با مقدار هلیوم بیش‌تر، باعث عمق نفوذ و عرض جوش بیش‌تر شده و محدوده قابل اطمینان جوش را گسترده‌تر می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که سرعت سرد کردن تاثیر زیادی در تشکیل فاز مارتنزیت دارد.

سپاسگزاری

با تشکر و قدردانی از جناب آقای مهندس فریدون طوسی‌نژاد کارشناس ارشد آزمایشگاه متالوگرافی پژوهشکده حمل و نقل پژوهشگاه فضایی ایران که کمک شایانی در تصویربرداری میکروسکوپ نوری در این تحقیق انجام داده‌اند.

در بررسی خواص مکانیکی، اگرچه اندازه دانه‌ها در منطقه جوش بزرگ‌تر از منطقه فلز پایه و منطقه تحت تاثیر حرارت می‌شود (شکل ۸) و با توجه به این درشت شدن دانه‌ها، پیش‌بینی می‌شود که مقدار استحکام نهایی و تسلیم کم‌تر از مقدار استحکام فلز پایه شود؛ ولی نتایج برای تمامی نمونه‌های جوشکاری شده بدون عیب، نشان می‌دهد که استحکام منطقه جوش (استحکام تسلیم بین ۸۴۹ تا ۸۹۹ مگاپاسگال و استحکام نهایی بین ۹۱۹ تا ۹۷۳ مگاپاسگال) در مقایسه با استحکام فلز پایه (استحکام تسلیم و نهایی: ۸۵۴ و ۹۰۳ مگاپاسگال) افزایش یافته است. این افزایش می‌تواند به دلیل جذب مقدار کمی از اکسیژن محیط در حوضچه مذاب جوش و نیز ریزساختار منطقه جوش باشد (اکسیژن آلفا زاده شده و باعث افزایش استحکام می‌شود). این مقدار اکسیژن بیش‌تر در مقایسه با مقدار اکسیژن ورق خام (حتی در مقادیر چند ده ppm)، باعث افزایش استحکام و کاهش انعطاف-پذیری فلز جوش شود.

نتیجه‌گیری

نتایج جوشکاری ورق‌های ۳ میلی‌متر آلیاژ Ti-6Al-4V با روش قوس پلاسما نشان می‌دهد که یک محدوده قابل اطمینان از سرعت خطی جوشکاری و شدت جریان الکتریکی قوس جوشکاری وجود دارد که در آن

References:

- 1- ASM International, editor. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. 10th ed., United States of America : ASM Handbook, Vol. 2, 1990.
- 2- Y. M. Ahmed, K. S. M. Sahari, M. Ishak, "Welding of Titanium (Ti-6Al-4V) Alloys: A Review", Proceedings National Graduate Conference, Universiti Tenaga Nasional, Putrajaya Campus, 8-10 Nov 2012.
- 3- K Yonesawa, "Welding of titanium and titanium alloys", JorimalofL&ht hfetal li'eldingand Conrrnction, Vol. 25, pp. 149-163, 1987.
- 4- ASM International, editor. Heat Treating. 9th ed., United States of America : ASM Handbook, Vol. 4, 1991.
- [5] ASM International, editor. Welding, Brazing, And Soldering. 9th ed., The United States Of America : THE ASM, Vol. 6, 1993.
- 6- A. Estaki, A. Khodabandelou. S. M. M. Hadavi, M. Tamizifar, M. Parsa, "The effect of post-welding protection and heat treatment on the mechanical properties of Ti-6Al-4V welded TIG alloy, Proceedings of 12th International Conference on Manufacturing Engineering, Tehran, Iran, 2011.
- 7- F. T. Khaniverdi, M. Karimi Nouri, M. Balbasi, "Influence of welding parameters on penetration depth and depth-to-width ratio of Ti-6Al-4V alloy TIG", Proceedings of the first National Conference on Mechanical Engineering of Iran, Shiraz, Iran, 2014.
- 8- T. Otani, "Titanium Welding Technology", Nippon Steel Technical Report, 2007, Vol. 95, pp. 88-92, 2007.
- 9- S. Cui, Y. Shi, T. Zhu, W. Liu, "Microstructure, texture, and mechanical properties of Ti-6Al-4V joints by K-TIG welding", Journal of Manufacturing Processes, Vol. 37, pp. 418-424, 2019.
- 10- F. Javidrad, H. Farghadani, M. Haydari, M. Mashayekhy, "An investigation into the microstructure and mechanical properties of Ti-3Al-2.5V under micro-plasma arc welding", Modares Mechanical Engineering. Vol. 13, pp. 199-209, 2014.
- 11- M. Baruah, S. Bag, "Influence of heat input in microwelding of titanium alloy by microplasma arc", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 231, pp. 100-112, 2016.
- 12- M. B. Mathisen, L. Eriksen, Y. Yu, O. Jensrud, J. Hjelen, "Characterization of microstructure and strain response in Ti-6Al-4V plasma welding deposited material by combined EBSD and in-situ tensile test", Trans. Nonferrous Met. Soc. China, Vol. 24, pp. 3929-3943, 2014.
- 13- N. Sares, M. G. Pillai, J. Mathew, "Investigations into the effects of electron beam welding on thick Ti-6Al-4V titanium alloy", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 192-193, pp. 83-88, 2007.
- 14- V. Srimaneepong, T. Yoneyama, E. Kobayashi, H. Doi, T. Hanawa, "Comparative study on torsional strength, ductility and fracture characteristics of laser-welded alpha+beta Ti-6Al-7Nb alloy, CP Titanium and Co-Cr alloy dental castings", Dental Materials, Vol. 24, pp. 839-845, 2008.
- 15- S. Gh. Razavi, M. Saboktakinrizi, M. Taheri, "Mechanical and Physical Properties Laser and GTA Welding of Commercial Pure Titanium", Journal of New Materials, Vol. 4, pp. 71-80, 2014.
- 16- Y. Zhang, Y. S. Sato, H. Kokawa, S. H. Park, S. Hirano, "Microstructural

characteristics and mechanical properties of Ti-6Al-4V friction stir welds", *Materials Science and Engineering A*, 2008, Vol. 485, pp. 448-455, 2008.

17- M. Sadeghi Gogheri, M. Shabani, E. Mirzapour, M. Kasiri, "Friction stir welding of dissimilar joint of aluminum alloy 5083 and commercially pure titanium", *Journal of Welding Science and Technology of Iran* 2016, Vol. 2, pp. 49-56, 2016.

18- K. H. Tseng, S. T. Hsieh, C. C. Tseng, Effect of process parameters of micro-plasma arc welding on morphology and quality in stainless steel edge joint welds, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 8, pp. 423-430, 2003.

19- J. Szusta, N. Tüzün, Ö. Karakaş, "Monotonic mechanical properties of titanium grade 5 (6Al-4V) welds made by microplasma", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 100, pp. 27-38, 2019.

20- C. S. Wu, L. Wang, W.J. Ren, X. Y. Zhang, "Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 16, pp. 74-85, 2013.

21- F. Karimzadeh, M. Salehi, A. Saatchi, and M. Meratian, "Effect of microplasma arc welding process parameters on grain growth and porosity distribution of thin sheet Ti6Al4V alloy weldment", *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 20, pp. 205-219, 2005.

22- A. B. Short, D. G. McCartney, P. Webb and E. Preston, "Influence of nozzle orifice diameter in keyhole plasma arc welding", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 16, pp. 446-452, 2011.

23- J. P. L. SILVA, A. J. F. NETO, L. H. A. RAPOSO, V. R. NOVAIS, C. A. de

ARAUJO, L. de A. L. CAVALCANTE, P. C. S. JÚNIOR, "Effect of Plasma Welding Parameters on the Flexural Strength of Ti-6Al-4V Alloy", *Braz Dent J*, Vol. 23, pp. 686-691, 2012.

24- X.F. Liu, C. S. Wu, C. B. Jia, G. K. Zhang, "Visual sensing of the weld pool geometry from the topside view in keyhole plasma arc welding", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 26, pp. 74-83, 2017.

25- C. Jian-chun, P. Chun-xu, "Welding of Ti-6Al-4V alloy using dynamically controlled plasma arc welding process", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, pp. 1506-1512, 2011.

26- J. Chuan-bao, W. Chuan-song, Z. Yu-ming, "Sensing controlled pulse key-holing condition in plasma arc welding", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 19, pp. 341-346, 2009.

27- F. X. Wang, J. P. He, J. Fang, F. Xiang, L. Ren, "Study of Titanium foil welding using Micro-plasma arc welding", *Advanced Materials Research*, Vols. 538-541, pp. 1469-1472, 2012.

28- A. Rahimi, M. Shamanian, A. Rahimi, J. Kangazian, "A Comparative Study on Direct and Pulsed Current Micro-plasma Arc Welding of Alloy Ti-6Al-4V", *Trans Indian Inst Met*, Vol. 71, pp. 3103-3110, 2018.

29- A. Sunny Kumar, T. V. Hanumanth Rao, V. V. S. Kesava Rao, R. T. Rama Kanth, "Optimizing pulsed current micro plasma arc welding parameters to maximize ultimate tensile strength of titanium (Ti-6Al-4V) alloy using Dragon fly algorithm", *Materials Today Proceedings*, In press, 2019.

30- Technical Committee ISO/TC44/SC10 "Quality management in the field of welding", *Welding recommendation for*

welding of metallic materials-Part
1:General guidance for arc welding, Vol.
2, pp. 1-11, 2002.

31- Welding recommendation for welding
of metallic materials-Part 1:General
guidance for arc welding, 1998.