



بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ تیتانیوم Ti-3Al-2.5V تحت فرایند جوش کاری میکروپلازما

فرهاد جاویدراد^{۱*}، حسین فرقدانی^۲، محمد حیدری^۳، مهدی مشایخی^۴

۱- دانشیار مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران
۲- کارشناس ارشد مواد- جوش کاری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران
۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد هوافضا، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران
* تهران، کد پستی ۱۱۳-۶۳۱۱۳-۱۳۸۴۶، f_javidrad@yahoo.com

چکیده- در این مقاله، فرایند جوش کاری میکروپلازما بر روی ورق نازک از آلیاژ تیتانیوم Ti-3Al-2.5V گزارش شده است. نمونه‌های تجربی با جریان، ولتاژ، سرعت جوش کاری و گذر نرخ حجمی گاز محافظ کنترل شده تحت جوش کاری قرار گرفتند. خواص مکانیکی و ریزساختار نمونه‌های جوش کاری شده مورد بررسی قرار گرفت تا پارامترهای مناسب جوش کاری مشخص شود. آزمایش‌های مکانیکی شامل آزمون کشش، خمش و میکروسختی‌سنجی نشان داد که در صورت تنظیم صحیح پارامترهای جوش کاری، استحکام کشش نمونه‌های جوش کاری شده به فلز اصلی بسیار نزدیک است در حالی که سختی فلز جوش از فلز اصلی و منطقه تحت تأثیر گرما (HAZ) بیشتر می‌باشد. آزمایش‌های شکست‌نگاری، طیف سنجی پراش اشعه X و متالوگرافی برای مطالعه سطح شکست و تغییرات ریزساختار مورد استفاده قرار گرفتند. این آزمایش‌ها نشان دادند که به طور کلی شکست نمونه‌ها از نوع شکست نرم بوده و تغییر فاز مارتنزیتی از فاز β در درجه حرارت بالا به فاز α' سوزنی شکل در منطقه جوش و HAZ اتفاق می‌افتد.

کلیدواژه‌گان: آلیاژ تیتانیوم Ti-3Al-2.5V، جوش کاری میکروپلازما، ریزساختار، مورفولوژی سطح شکست، متالوگرافی.

An investigation into the microstructure and mechanical properties of Ti-3Al -2.5V under micro-plasma arc welding

F. Javidrad^{1*}, H. Farghadani², M. Haydari³, M. Mashayekhy⁴

1-Assoc. Prof.r of Aerospace Eng., Dept. of Aerospace Eng., Shahid Sattari Aeronautical Univ. of Sci. and Tech., Tehran, Iran
2- Instructor of Welding Tech., Dept. of Aerospace Eng., Shahid Sattari Aeronautical Univ. of Sci. and Tech., Tehran, Iran
3,4- MSc. Graduate, Dept. of Aerospace Eng., Shahid Sattari Aeronautical Univ. of Sci. and Tech., Tehran, Iran
* P.O.B. 13846-63113, Tehran, Iran. f_javidrad@yahoo.com

Abstract-

In this paper, the process of joining Ti-3Al-2.5V titanium alloy thin sheets by means of micro-plasma arc welding (MPAW) is reported. The specimens were welded under controlled welding parameters, such as voltage, current, travel speed and shielding gas flow rate. An appropriate set of parameters for MPAW process was examined by mechanical properties tests and microstructure characterization. Mechanical tests including tensile test, bending test and micro-hardness evaluation across the weld line generally show that if suitable welding parameters are used, the tensile strength of the welded specimen is well comparable with that of the base metal, while its hardness increased at the fusion zone (FZ). Fractography, X-ray diffraction and metallography were also performed to study the microstructure evolution. SEM images of the fracture surface presented characteristics of ductile rupture. Studies on microstructure morphology of the specimens at the FZ and HAZ reveal occurrence of phase transformation from high temperature β phase to acicular α' phase.

Keywords: Ti-3Al-2.5V Titanium Alloy, Micro-Plasma Arc Welding, Microstructure, Fracture Surface Morphology, Metallograph.

۱- مقدمه

۱-۱- تیتانیوم

استحکام بالا نسبت به وزن، مقاومت خوردگی عالی، چقرمگی خوب و چگالی پایین تیتانیوم و آلیاژهای آن باعث شده است این ماده کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا، پتروشیمی و شیمیایی داشته باشد [۲،۱]. این فلز مانند آهن، دارای استحاله آلوتروپی در درجه حرارت حدود 882°C می‌باشد که این استحاله با حالت انتقال کریستالی از شکل هگزآگونال شش وجهی (HCP) در دمای پایین به شکل مکعب مرکزدار (BCC) همراه است. وجود این استحاله، کاربرد تیتانیوم و آلیاژهای آن را در دماهای بالاتر از 800°C محدود کرده است [۳]. ولیکن با انجام عملیات حرارتی‌های مختلف روی تیتانیوم می‌توان به ریز ساختارهای مختلف و در نتیجه خواص مکانیکی مختلف دست یافت [۴].

تیتانیوم فلزی است که در صورت گرم شدن می‌تواند گازهای جوی یا عناصری مانند اکسیژن، نیتروژن، هیدروژن یا کربن را جذب کرده و در خود حل کند [۵،۶]. حل شدن این عناصر حتی در حد کم، سختی این فلزات را افزایش می‌دهد. وجود هیدروژن همچنین باعث کاهش چقرمگی و افزایش حساسیت فلز به ترک می‌شود. به همین دلیل باید این فلزات تحت محافظت گاز خنثی با خلوص بالا یا در داخل تجهیزات خلاء جوش کاری شوند.

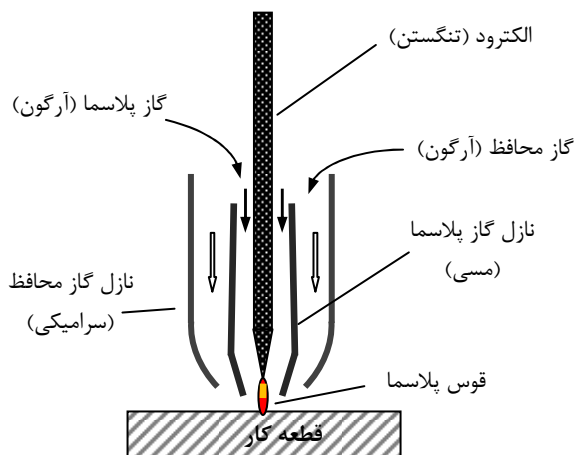
آلیاژ Ti-3Al-2.5V یکی از آلیاژهای گروه $\alpha\beta$ است که شامل ۳٪ آلومینیوم به عنوان تثبیت‌کننده فاز آلفا و ۲/۵٪ وانادیوم برای تثبیت فاز بتا می‌باشد. این آلیاژ که به آن آلیاژ نزدیک به α نیز گفته می‌شود، در حالت سرد نسبت به آلیاژ متداول و بسیار پر کاربرد Ti-6Al-4V قابلیت فرم‌دهی بهتری دارد؛ به این دلیل از آن برای ساخت لوله‌های بی‌درز برای سیستم‌های هیدرولیک و انتقال سوخت هواپیما و به صورت ورق برای قسمت‌های از سازه جدار نازک بدنه هواپیماهای نظامی که در معرض حرارت (تا محدوده 500°C) هستند، استفاده می‌کنند. قابلیت جوش کاری این آلیاژ بسیار خوب بوده و می‌توان آن را با اغلب روش‌های جوش کاری، از جمله جوش لیزر [۷]، جوش پرتو الکترونی [۸]، جوش اصطکاکی [۹] و جوش پلاسما^۱ جوش داد [۱۰].

۱-۲- جوش کاری قوس پلاسما

یکی از مشکلات جوش کاری ماده تیتانیوم در فرایند ساخت قطعات مکانیکی در صنایع خاص (مانند صنایع هوافضا)، حساسیت و وابستگی زیاد کارایی و قابلیت اطمینان اتصال به روش و پارامترهای استفاده شده در جوش کاری است. یکی از روش‌های مناسب برای جوش آلیاژهای تیتانیومی، جوش کاری پلاسما است که اساساً یک فرایند جوش کاری با گاز محافظ می‌باشد. در روش جوش پلاسما (PAW) از گاز خنثی (معمولاً گاز آرگون) برای ایجاد ستون پلاسما استفاده می‌شود و انرژی مورد نیاز برای جوش از طریق محیط پلاسما توسط یک قوس الکتریکی که بین الکترود تنگستن و قطعه کار برقرار می‌شود، تأمین می‌شود [۱۱]. محیط پلاسما از طریق یونیزه شدن گاز پلاسما ایجاد و انرژی حرارتی از این محیط به قطعه کار منتقل می‌شود (شکل ۱).

فرایند PAW برای اتصال در محدوده وسیعی از ضخامت‌ها (از 0.25 mm به بالا) مورد استفاده قرار می‌گیرد. جوش کاری پلاسما معمولاً در مواردی استفاده می‌شود که لازم باشد محل و گرده جوش و منطقه حرارت دیده مجاور آن تا حد ممکن باریک باشد. جوش کاری پلاسما در سه محدوده مختلف جریان امکان‌پذیر است:

میکروپلاسما: شدت جریان بین 0.8 تا 15 آمپر
جریان متوسط: شدت جریان بین 15 تا 200 آمپر
سوراخ کلیدی: شدت جریان بین 200 تا 400 آمپر.



شکل ۱- نمایی از شیوه جوش پلاسما

1. Plasma Arc Welding

2. Micro-Plasma Arc Welding

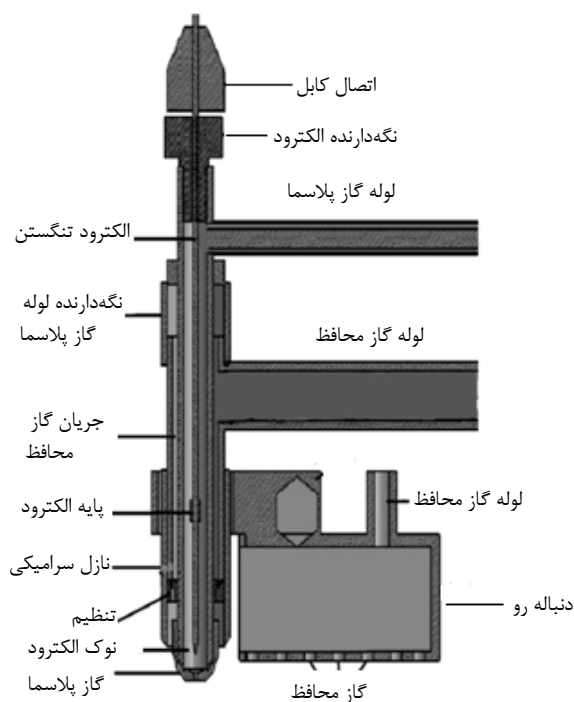
۲- فرایند جوش کاری میکروپلازما

۲-۱- تجهیزات و برپایی سامانه جوش کاری

در این تحقیق، از یک دستگاه متداول جوش آرگون (GTAW) استفاده شده و با طراحی و ساخت مشعل مناسب و فراهم کردن گاز پلازما، جوش میکروپلازما به توسط آن انجام شده است (شکل ۲).

مشعل جوش کاری میکروپلازما اساساً از دو لوله هم محور تشکیل شده که به توسط پایه‌هایی از جنس تفلون در موقعیت هم محوری نگاه داشته می‌شوند. لوله گاز محافظ از جنس برنج (بدلیل قابلیت خوب ماشین‌کاری) و لوله گاز پلازما از جنس مس (به دلیل ضریب انتقال حرارت بالا) ساخته شد. الکتروود تگستنی نیز در وسط لوله گاز پلازما با پایه‌های تفلونی نصب گردید.

در ساخت مشعل پلازما پارامترهای اندازه قطر نازل گاز پلازما و جنس آن و عایق کاری اجزای داخلی آن به عنوان پارامترهای مهم و مؤثر در کیفیت جوش کاری مد نظر قرار گرفت. برای ساخت نازل گاز پلازما، از فلز مس به دلیل ضریب بالای هدایت حرارتی آن با قطر ۱ mm استفاده شد و برای عایق کاری اجزای مشعل نیز از چسب سیلیکون RTV به دلیل مقاومت حرارتی بالا استفاده شد.



شکل ۲ نمایی از مشعل طراحی شده برای جوش میکروپلازما

روش میکروپلازما (MPAW) معمولاً برای جوش کاری قطعات نازک تا ضخامت ۳ mm به کار می‌رود.

پارامترهای مهم در جوش کاری پلازما شدت جریان، سرعت جوش کاری، قطر نازل مسی، میزان جریان گازهای پلازما و محافظ است که بسته به نوع آلیاژ و ضخامت قطعه باید بطور مناسب انتخاب شوند در مرجع [۱۲] اهمیت تنظیم دقیق این پارامترها در جوش کاری میکروپلازما به صورت تجربی بیان گردیده است. اگرچه مرجع [۱۲] به جوش کاری میکروپلازمای ورق فولادی ۳۰۴ با ضخامت ۰/۵ mm پرداخته است ولیکن نتایج بدست آمده به طور اصولی به جوش کاری میکروپلازما روی مواد دیگر از جمله تیتانیوم قابل تعمیم است. کریم‌زاده و همکاران [۱۳] از روش میکروپلازما برای جوش کاری آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V استفاده کرده و تأثیر پارامترهای جوش کاری از قبیل جریان، سرعت جوش کاری و نرخ جریان گاز محافظ را در رشد دانه و توزیع حفره‌ها بررسی نموده‌اند. آنها دریافتند که رشد دانه‌های فاز α اساساً به میزان حرارت مخصوص ورودی جوش بستگی داشته و این دانه‌ها توسط فاز α' محصور می‌شوند.

در تحقیق دیگر، جاویدراد و همکاران [۱۲] از روش میکروپلازما برای جوش کاری ورق‌های بسیار نازک از جنس فولاد ضد زنگ AISI 304 استفاده و دریافتند که پارامترهای ورودی تأثیر بسیار زیادی در کیفیت و استحکام جوش دارد و در عمل باید در انتخاب این پارامترها دقت زیادی شود. اثر تمیزکاری سطح و استفاده از لایه‌برداری لیرزی در کیفیت جوش کاری و ریزساختار لوله‌های ساخته شده از آلیاژ تیتانیوم Ti-3Al-2.5V توسط کومار و همکاران [۱۴] مورد بررسی قرار گرفته است.

تاکنون تعداد بسیار محدودی مقاله و گزارش‌های تحقیقاتی در مورد استفاده از روش MPAW برای اتصال آلیاژهای تیتانیومی منتشر شده است و در ادبیات موضوع نتایج منتشر شده‌ای در مورد جوش کاری میکروپلازما ورق‌های نازک ساخته شده از آلیاژ Ti-3Al-2.5V در دسترس نمی‌باشد. عمده تحقیقات در این حوزه، به آلیاژ Ti-6Al-4V اختصاص داده شده است.

از سوی دیگر، وابستگی ریزساختار و رفتار ماده جوش کاری شده به فرایند و پارامترهای آن مبین اهمیت موضوع می‌باشد.

مرحله‌ای و به روش دستی انجام شد. تصویر بزرگ‌نمایی شده خط جوش و پشت آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

۲-۳ پارامترهای جوش کاری

به صورت تجربی و با آزمون و خطا مشاهده شد که مقادیر مناسب نرخ گذر حجمی گاز محافظ و گاز پلازما به ترتیب برابر 18 lit/min و 0.7 lit/min می‌باشد. لذا در کلیه آزمایش‌ها، جریان گاز پلازما ثابت و برابر 0.7 lit/min قرار داده شد. برای تعیین اثر گاز محافظ، علاوه بر جریان 18 lit/min از نرخ گذر حجمی 16 lit/min نیز استفاده گردید. انرژی حرارت ورودی مخصوص از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$H_j = \frac{\eta VI}{v} \quad (1)$$

که در آن I شدت جریان، V پتانسیل جوش کاری، v سرعت پیشروی حرکت مشعل و η راندمان حرارتی است که بر اساس مرجع [۱۷] برای جوش پلازما برابر 0.6 می‌باشد. براساس نتایج بدست آمده از آزمون‌های انجام شده با جریان، ولتاژ و سرعت جوش کاری کنترل شده بر اساس داده‌های جدول ۱، حداقل انرژی حرارت ورودی مخصوص برای جوش با نفوذ کامل در حدود 76 J/mm برآورد شد. چنانچه حرارت ورودی از حدود 140 J/mm بیشتر شود، علاوه بر ذوب قطعه‌کار، نازل مسی نیز دچار آسیب می‌شود. همچنین افزایش حرارت ورودی موجب افزایش عرض ناحیه جوش نیز می‌شود که در اغلب موارد مطلوب نیست. انتخاب میزان گذر حجمی گاز محافظ دنباله‌رو و گاز پشت‌بند نیز باید به گونه‌ای باشد که ناحیه جوش را در مقابل اکسید شدن و عوامل اتمسفری حفاظت کند؛ که به طور تجربی مقدار 14 lit/min مناسب تشخیص داده شد.

چهار متغیر جریان، ولتاژ، سرعت پیشروی و نرخ گذر جریان گاز محافظ به عنوان متغیرهای اصلی در طراحی پارامترهای جوش کاری نمونه‌ها مورد توجه قرار گرفت. بر این اساس در ۱۰ حالت (جدول ۲)، نمونه‌های جوش کاری شده ایجاد گردید. در این تحقیق، کمیت اصلی برای سنجش جوش میکروپلازما روی آلیاژ تیتانیوم مورد نظر، گرمای ورودی مخصوص در نظر گرفته شده است. لذا بازه تغییرات برای متغیرهای جریان و پتانسیل محدود در نظر گرفته شده و تغییر در گرمای ورودی مخصوص عمدتاً بر اساس تغییر در سرعت پیشروی متوسط ایجاد شده است.

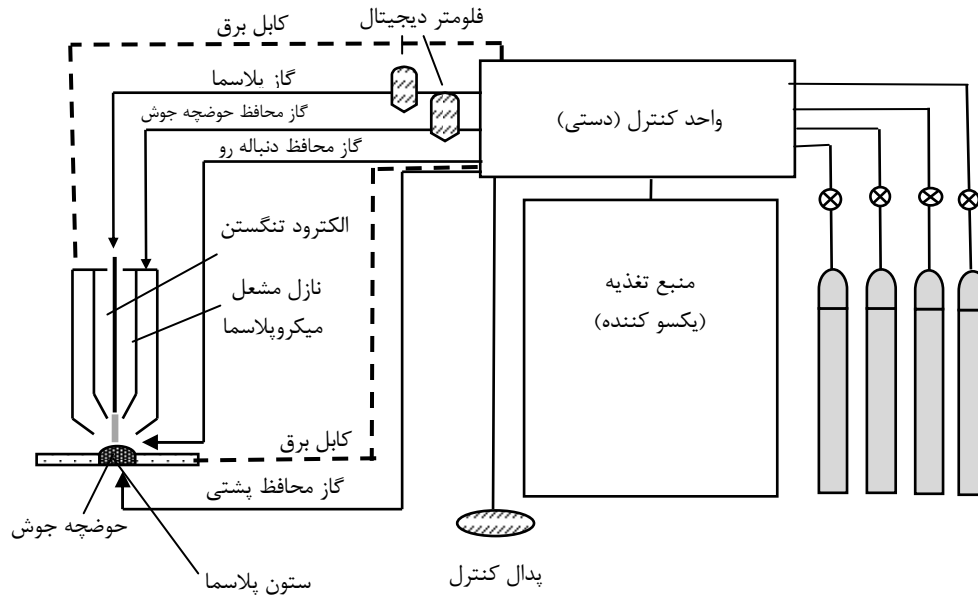
برای تنظیم نرخ گذر گاز محافظ، از رینگ‌های تفلونی که روی آن هشت سوراخ با فاصله مساوی تعبیه گردیده بود، به عنوان شیر تنظیم استفاده شد. این رینگ‌ها پشت نازل سرامیکی (شکل ۲) در مسیر عبور گاز محافظ نصب گردید. سامانه گاز محافظ دنباله‌رو نیز از ورق نازک آهن به شکل قوطی ساخته شد و سوراخ‌ها و اتصالات مناسب برای جریان گاز آرگون روی آن تعبیه گردید.

به دلیل پایین بودن شدت جریان مصرفی، مشعل نیاز به سیستم خنک‌کاری آب نداشته و لذا در ساخت آن لحاظ نشده است. ابعاد دقیق و نقشه ساخت مشعل مورد نظر در مرجع [۱۵] آورده شده است. برای حفاظت بهتر از فلز حوضچه جوش و منطقه گرما دیده^۱ (HAZ)، از گاز حفاظت کننده ثانویه (از نوع دنباله‌رو^۲) نیز استفاده شد که در طراحی مشعل آورده شده است. همچنین به منظور انتقال حرارت مناسب از قطعه و حفاظت از منطقه پشت جوش، راهگاه جریان گاز محافظ منطقه پشت جوش در طراحی و ساخت قید و بند نگهدارنده قطعه‌کار تعبیه گردید که نقشه‌ها و کلیه ابعاد قید و بند نگهدارنده نیز در مرجع [۱۵] آورده شده است. طرح‌واره تجهیزات جوش کاری میکروپلازما استفاده شده در این تحقیق، در شکل ۳ نشان داده شده است.

۲-۲ آماده‌سازی نمونه‌ها و تنظیمات

نمونه‌ها از ورق تیتانیوم آنیل شده Ti-3Al-2.5V به شکل مستطیل به ابعاد $100 \times 25 \times 0.8 \text{ mm}$ بریده شده تا به صورت لب به لب جوش کاری شوند. نمونه‌ها ابتدا با استن چربی‌زدایی شده و با آب شستشو داده شدند. پس از خشک شدن با وزش باد گرم به مدت ۵ دقیقه در محلول اسید نیتریک 65% اکسیدزدایی گردیدند. پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها در قید و بند قرار گرفتند. از جریان مستقیم با الکتروود منفی (DCEN) و نوع الکتروود تنگستنی حاوی 2% تریوم (EWTh-2) با نوک تیز و زاویه راس 45° و قطر 1 mm برای جوش کاری استفاده شد. بر طبق مرجع [۱۶]، در جوش کاری با جریان ثابت الکتروود تنگستنی با 2% تریوم به صورت نوک تیز بسیار مناسب می‌باشد. میزان گاز پلازما با توجه به مقادیری که در آزمایشات به دست آمده بود تعیین و جوش کاری بصورت لب به لب و تک

1. Heat-Affected Zone
2. Trailing Shielding Gas

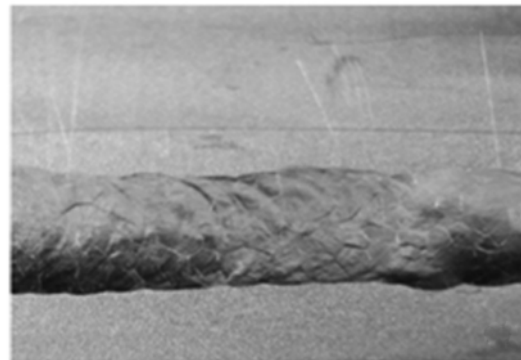


شکل ۳ نمایشی از برپایی جوش پلازما

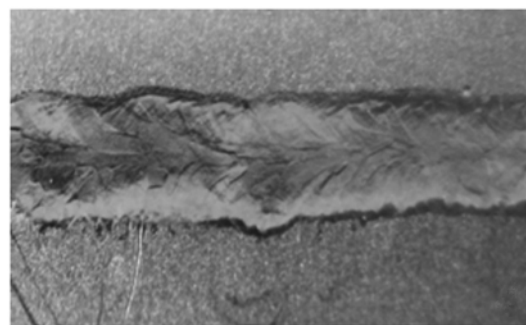
استاندارد ASTM-E-8 و ابعاد داده شده در شکل ۵ توسط دستگاه واترجت بریده شد؛ به گونه‌ای که در نمونه‌های جوش کاری شده، جوش در وسط نمونه عمود بر جهت اعمال بار قرار داشته باشد.

جدول ۱ مشخصات جوش نمونه‌ها

لب به لب	نوع اتصال جوش
تک مرحله‌ای	تعداد پالس
تخت	موقعیت جوش
تخت همراه با فک‌های مسی	قید و بند
بدون خنک کاری آب (A 15)	مشعل
EWTh-2 با قطر 1 mm	الکتروود
استفاده نشده	فلز پر کننده
آرگون با نرخ گذر 0/7 lit/min	گاز پلازما
آرگون با نرخ گذر 16 lit/min و 18 lit/min	گاز محافظ
آرگون با نرخ گذر 14 lit/min	گاز دنباله‌رو
آرگون با نرخ گذر 14 lit/min	گاز محافظ پشتی
3 mm - 2/5 mm	فاصله نازل تا قطعه کار
220 ولت - 300 آمپر	دستگاه جوش
10، 12، 13 و 14 آمپر	جریان
19، 20 و 20 ولت	ولتاژ
2/2 mm/s و 1/6 mm/s	سرعت جوش کاری
استفاده نشده	عملیات حرارتی قبل و بعد از جوش کاری



الف- روی خط جوش



ب- پشت خط جوش

شکل ۴ تصویر بزرگنمایی شده جوش

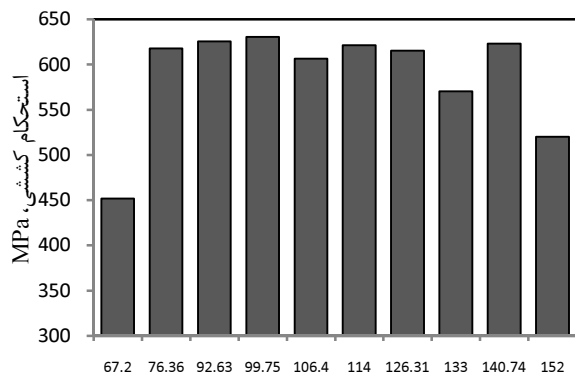
۳- آزمون و تحلیل نمونه‌های جوش کاری شده

۳-۱- آزمون کشش

نمونه‌های جوش کاری شده و نمونه‌هایی از فلز اصلی بر اساس

جدول ۳ نتایج آزمون کشش فلز اصلی

نمونه	استحکام سیلان (MPa)	استحکام کشش (MPa)	ازدیاد طول %
فلز اصلی	۵۴۳	۶۳۵	۱۷/۴



حرارت ورودی مخصوص برحسب J/mm

شکل ۶ استحکام کششی نمونه‌ها برحسب گرمای ورودی مخصوص

با افزایش گرمای ورودی مخصوص، استحکام کشش نمونه‌های جوش کاری شده قدری افزایش می‌یابد؛ به گونه‌ای که بیشترین استحکام کشش متعلق به نمونه با گرمای ورودی مخصوص ۹۹/۷۵ J/mm است. و با افزایش گرمای ورودی از این مقدار، استحکام کشش کمی کاهش یافته به گونه‌ای که در نمونه با گرمای ورودی مخصوص ۱۵۲ J/mm استحکام کشش به ۵۲۰ MPa کاهش می‌یابد. در این گرمای ورودی ذوب زیاد در ماده اتفاق افتاده که منجر به ایجاد حباب و سوراخ در خط جوش گردیده است. این گرمای ورودی مخصوص و بیشتر از آن برای جوش کاری ورق تیتانیوم Ti-3Al-2.5V با ضخامت ۰/۸ mm مناسب نمی‌باشد.

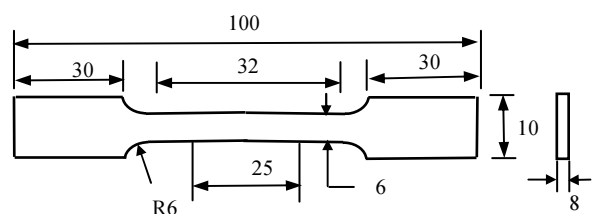
نرخ گذر حجمی گاز محافظ از عوامل تأثیرگذار در خواص مکانیکی جوش است. لذا به منظور بررسی تأثیر نرخ گذر حجمی گاز محافظ در استحکام کششی اتصال، علاوه بر مقدار نرخ گذر گاز مناسب ۱۸ lit/min، از مقدار ۱۶ lit/min نیز استفاده شده است. در شکل ۷ استحکام کشش نمونه‌ها برحسب گرمای ورودی مخصوص در دو مقدار مختلف نرخ گذر گاز محافظ نمایش داده شده است. با توجه به نتایج آزمون‌ها، نرخ گذر گاز محافظ ۱۸ lit/min در محدوده گرمای ورودی مخصوص بین حدود ۸۰ J/mm تا ۱۴۰ J/mm مناسب‌تر از ۱۶ lit/min می‌باشد. همچنین دیده می‌شود که محدوده

جدول ۲ پارامترهای استفاده شده برای جوش کاری نمونه‌ها.

شماره نمونه	نرخ گذر گاز محافظ lit/min	سرعت متوسط پیشروی mm/sec	پتانسیل (ولت)	جریان (آمپر)	گرمای ورودی مخصوص J/mm
۱	۱۸	۲/۲۰	۲۰	۱۴	۷۶/۳۶
۲	۱۸	۲/۵۰	۲۰	۱۴	۶۷/۲۰
۳	۱۸	۱/۶۰	۱۹	۱۴	۹۹/۷۵
۴	۱۸	۱/۶۰	۱۹	۱۳	۹۲/۶۳
۵	۱۶	۰/۹۵	۲۰	۱۰	۱۲۶/۳۱
۶	۱۸	۰/۸۱	۱۹	۱۰	۱۴۰/۷۴
۷	۱۸	۰/۷۵	۱۹	۱۰	۱۵۲/۰۰
۸	۱۶	۱/۲۰	۱۹	۱۲	۱۱۴/۰۰
۹	۱۶	۱/۵۰	۱۹	۱۴	۱۰۶/۴۰
۱۰	۱۶	۱/۲۰	۱۹	۱۴	۱۳۳/۰۰

اگرچه در استاندارد ASTM-E-8 به برش نمونه توسط براده-برداری (ماشینکاری) اشاره شده است، ولی به دلیل افزایش دقت در برش نمونه‌ها و کمترین آسیب به لبه‌های نمونه، در این تحقیق از سامانه واتر جت برای برش استفاده شده است. نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کشش پیچی با حداکثر ظرفیت کشش ۴۰ تن تحت آزمایش کشش قرار گرفتند. نتایج آزمون‌ها برای فلز اصلی در جدول ۳ و نتایج آزمون‌های استحکام کشش برای نمونه‌های جوش کاری شده برحسب گرمای ورودی مخصوص در شکل ۶ نمایش داده شده است.

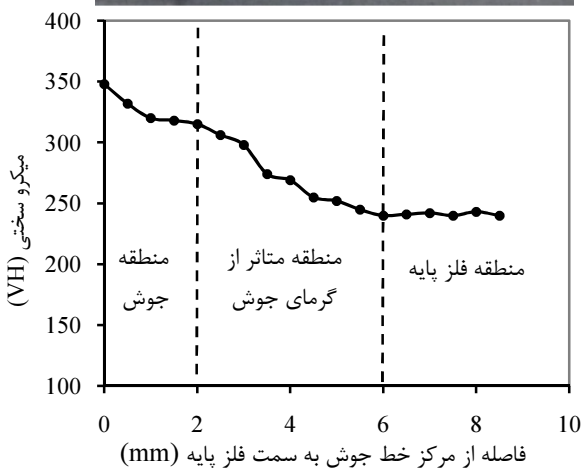
با توجه به نتایج آزمون‌ها، نمونه با گرمای ورودی مخصوص ۶۷/۲ J/mm کمترین استحکام کشش را دارد که علت آن نفوذ کم جوش است و با افزایش گرمای ورودی مخصوص به ۷۶/۳۶ J/mm استحکام کشش به ۶۱۷/۸ MPa افزایش یافته است که نسبت به استحکام کشش فلز اصلی کاهش کمی دارد. لذا می‌توان حداقل گرمای ورودی مخصوص مناسب برای جوش کاری نمونه‌ها را همان ۷۶/۳۶ J/mm در نظر گرفت که موجب نفوذ مناسب و کیفیت مطلوب جوش می‌شود.



شکل ۵ نمونه تست کشش براساس استاندارد ASTM-E-8 (اندازه‌ها بر حسب میلی‌متر است.)

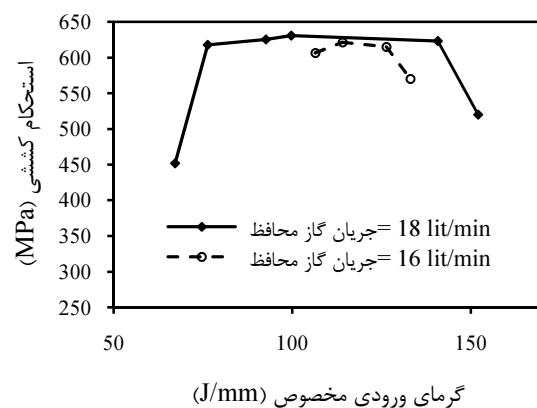
۳-۳- آزمایش سختی سنجی

میکروسختی‌سنجی از فلزجوش، HAZ و فلز اصلی با نیروی ۹/۸ نیوتن و زمان پارگذاری ۲۰ ثانیه انجام شد. هر آزمایش از روی مرکز خط جوش شروع و تا فلز اصلی ادامه داشت. فاصله هر نقطه مورد آزمون سختی‌سنجی با نقطه قبلی ۰/۵ mm بود. آزمایش تا نزدیک شدن مقادیر سختی به سختی فلز اصلی ادامه داشت. همچنین آزمایش میکروسختی در امتداد مرکز خط‌جوش نمونه نیز با فواصل ۰/۵ mm انجام شد که البته تغییرات زیادی در سختی آن مشاهده نشد (حداکثر تغییرات سختی در طول خط جوش حدود ۶٪ بوده است). نتایج آزمون برای نمونه B₁ در شکل ۸ نشان داده شده که مبین حدود ۴۰٪ افزایش سختی فلز جوش نسبت به فلز اصلی است. سختی از مرکز جوش به طور نسبتاً یکنواختی کاهش و تا فاصله ۶ میلی‌متری از خط جوش به سختی فلز اصلی می‌رسد. لذا، عرض منطقه متأثر از گرمای جوش حدود ۴ mm تقریب زده می‌شود. در سایر نمونه‌ها نیز تغییرات مشابه مشاهده گردید که در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۸ تغییرات سختی بر اساس فاصله از فلز پایه به طرف خط جوش برای نمونه B₁

مناسب گرمای ورودی مخصوص به طور مستقیم به نرخ گذر گاز محافظ وابسته است. به گونه‌ای که برای نرخ گاز محافظ ۱۶ lit/min، بازه مناسب برای جوش کاری ورق مورد نظر، به محدوده بین حدود ۱۲۵ J/mm تا ۱۳۵ J/mm کاهش می‌یابد. در ادامه، سه نمونه از نمونه‌های جوش کاری شده که در آزمون‌های بعدی روی آنها تمرکز شده است به شرح جدول ۴ نامگذاری شده‌اند.



شکل ۷ استحکام کششی نمونه‌ها برحسب گرمای ورودی مخصوص در دو مقدار مختلف نرخ گذر گاز محافظ

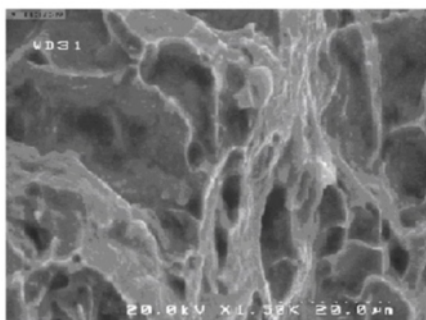
جدول ۴ نتایج آزمون کشش نمونه‌های جوش کاری شده

نمونه	نرخ گذر گاز محافظ lit/min	حرارت ورودی مخصوص J/mm	استحکام کشش MPa	درصد ازدیاد طول %
B ₁	۱۸	۹۹/۷۵	۶۳۰/۸	۱۶/۲
B ₂	۱۸	۹۲/۶۳	۶۲۵/۶	۱۴/۸
B ₃	۱۶	۱۱۴/۰۰	۶۲۱/۴	۱۳/۴

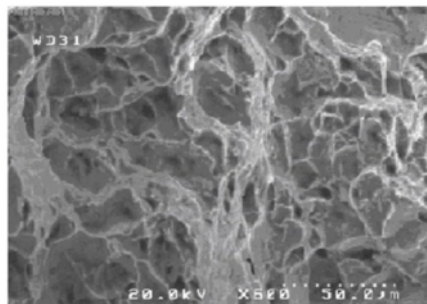
۳-۲- آزمون خمش

برای اطمینان از چقرمگی و انعطاف‌پذیری فلز جوش، نمونه‌های جدول ۳ بر اساس استاندارد ASME SEC IX تحت آزمایش خمش قرار گرفتند که در این آزمون‌ها هیچگونه شکاف و ترک در خط جوش و ناحیه HAZ مشاهده نشد. عدم وجود ترک، یکی از معیارهای نشان‌دهنده محافظت خوب و کیفیت مطلوب فرایند جوش کاری میکروپلازما بر روی آلیاژ تیتانیوم Ti-3Al-2.5V می‌باشد.

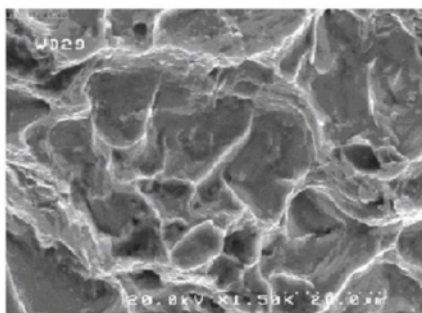
کریستالی و موقعیت آنها از طیف‌سنج پراش اشعه X استفاده می‌شود [۱۸]. از دستگاه XRD با مدل X-Pert ساخت شرکت فلیس برای مشخص کردن فاز ساختمان فلز جوش، استفاده شد.



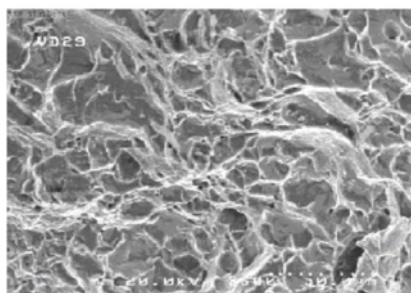
الف- نمونه B₂ با بزرگ‌نمایی X1.5k



ب- نمونه B₂ با بزرگ‌نمایی X600

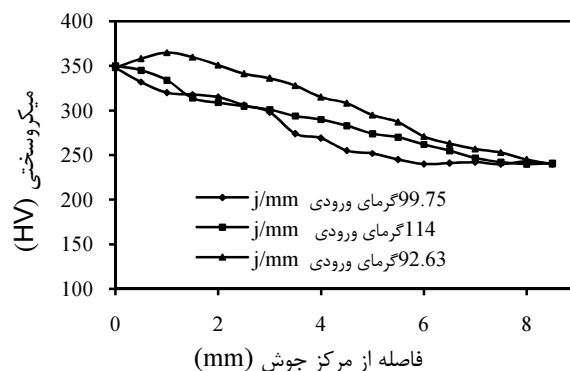


ج- نمونه B₁ با بزرگ‌نمایی X1.5k



د- نمونه B₁ با بزرگ‌نمایی X600

شکل ۱۰ مقایسه نوع شکست نمونه‌ها



شکل ۹ تغییرات سختی بر اساس فاصله از فلز پایه به طرف خط جوش و در امتداد مرکز خط جوش برای سه نمونه B₁، B₂ و B₃

۳-۴- آنالیز سطح مقطع شکست

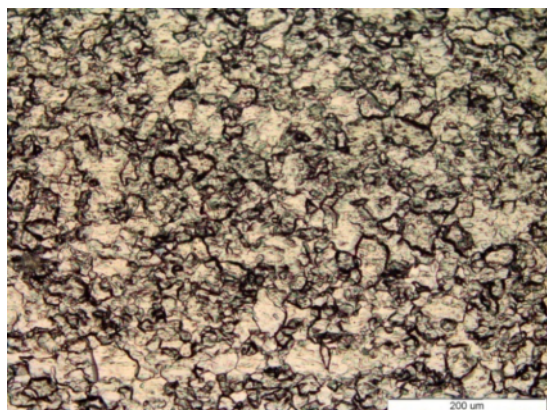
با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح مقطع شکست دو نمونه B₁ و B₂ که در آزمایش استحکام کشش دچار شکست شده بودند عکس گرفته شد.

با مطالعه عکس‌ها مشاهده گردید که در کلیه نمونه‌ها سطوح شکست نمونه‌ها کاملاً شبیه به سطوح شکست نرم است. شکست نرم از داخل دانه با اندازه و عمق‌های متفاوت در سطح شکست نمونه‌ها آغاز و پارگی نیز در بعضی نقاط سطوح اتفاق افتاده است. در مورفولوژی شکست نمونه B₂ شکست نرم از داخل دانه در بعضی نقاط سطح متقارن و در بعضی نقاط دیگر سطح پارگی اتفاق افتاده است. همان طور که در قسمت‌های (الف) و (ب) شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، ترک‌های ریز در مقطع شکست شکل گرفته و سپس در سطح گسترش یافته‌اند. به علت نیروی کشش وارد به نمونه و جابجایی‌ها در جهت اعمال بار ترک گسترش یافته که منجر به گسیختگی نرم از داخل دانه‌ها شده است.

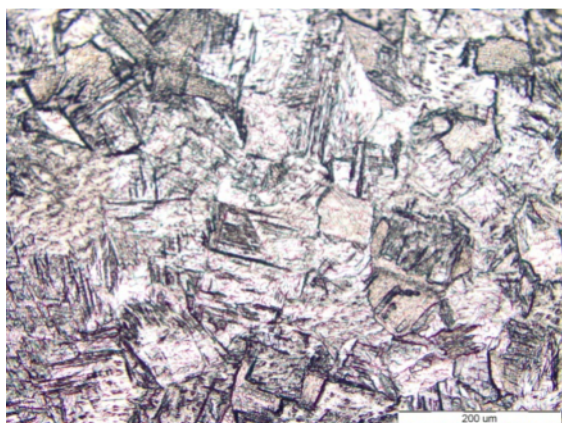
مورفولوژی شکست نمونه B₁ در قسمت‌های (ج) و (د) شکل ۱۰ نشان داده شده است. شکست نرم از داخل دانه در بیشتر نقاط به صورت متقارن اتفاق افتاده و در نقاط کمی پارگی رخ داده است. شکست نرم از داخل دانه، مسیر رشد ترک‌های ریز و انرژی استحکام کشش نسبت به نمونه B₂ قدری متفاوت است. چنین شکست نرمی نتیجه چقرمگی بالاتر نمونه B₁ نسبت به نمونه B₂ است.

۳-۵- طیف‌سنج پراش اشعه ایکس (XRD)

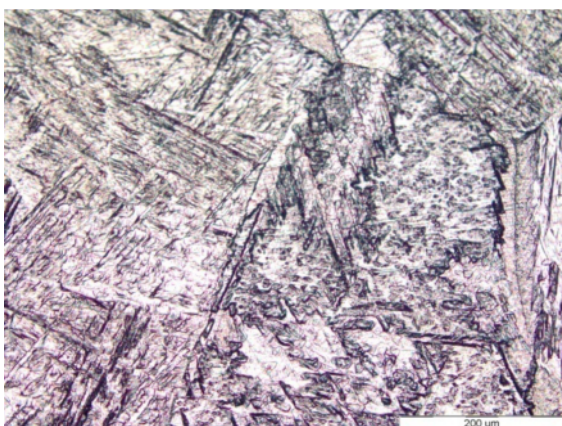
برای تعیین ساختار کریستالی مواد و تشخیص فازهای



الف- فلز اصلی (مناطق روشن نشاندهنده فاز α و مناطق تیره مربوط به فاز β می باشد).



ب- منطقه HAZ (این منطقه شامل دو فاز α و β و فاز ماترنیتی α' می باشد. ابعاد دانه‌ها نسبت به فلز ماده بزرگتر و مقدار فاز β نیز کاهش یافته است).



ج- فلز جوش (در این منطقه فاز α به طور کامل به فاز ماترنیتی α' زنبیلی شکل تبدیل شده و مقادیر نسبتاً کمی از فاز β در اطراف فاز ماترنیتی دیده می شود)

شکل ۱۲ نمونه متالوگرافی B₂ با بزرگ‌نمایی 200X

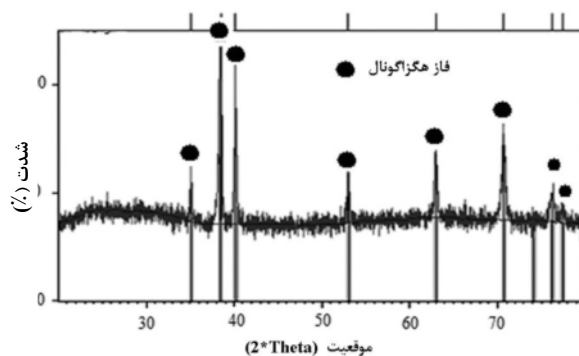
به عنوان نمونه، طیف XRD برای یکی از نمونه‌های آزمایش در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همه نقاط پیک این نمودار متعلق به فاز هگزگونال است.

لذا این نمودار بیانگر وجود مقدار نسبتاً زیادی فاز α' و α در فلز جوش شامل می‌باشد. (ساختار فاز α' هگزگونال است؛ و پیک‌های آن با فاز α مشابه می‌باشد که در شکل ۱۱ نیز فقط ساختار هگزگونال دیده شده است). البته فاز β نیز به مقدار کمی در فلز جوش وجود دارد؛ ولیکن با توجه به مقدار کم آن و دقت دستگاه مورد استفاده، نمی‌توان پیکی از نمودار را به فاز β نسبت داد.

مقدار پیک ماکزیمم بدست آمده از آزمون طیف XRD نمونه B₂ بیشتر از نمونه B₁ بیشتر است که نشان دهنده بیشتر بودن فاز هگزگونال در این نمونه است. با توجه به این که استحکام شکست در نمونه B₂ قدری کمتر از استحکام شکست نمونه B₁ می‌باشد، این افزایش فاز هگزگونال احتمالاً مربوط به فاز α است.

۳-۶- ریز ساختار

نمونه‌های متالوگرافی از منطقه جوش، HAZ و فلز اصلی جدا شده و با دستگاه مانیت گرم، آماده صیقل کاری شد. سپس با استفاده از سنباده متحرک با درجات مختلف، کاملاً پرداخت شده و با استفاده از محلول شیمیایی (3 ml HF+6 ml HNO₃+100 ml H₂O) اچ گردید. نهایتاً، تصاویر ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری از نمونه‌ها تهیه شده است. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نمونه‌هایی از نتایج متالوگرافی را نشان می‌دهند.



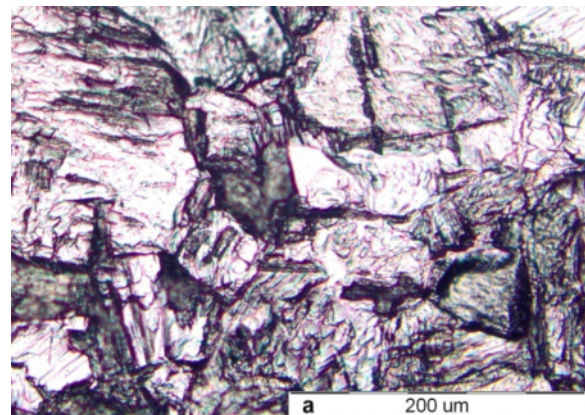
شکل ۱۱ طیف XRD نمونه B₁

علت اصلی افزایش سختی و متعاقب آن استحکام در منطقه جوش و منطقه HAZ کاهش فاز β است که با وجود فاز مارتنزیتی α' تشدید می‌شود. کاهش فاز β در این مناطق همچنین با آزمون طیف‌سنج پراش اشعه ایکس (شکل ۱۱) تایید می‌شود.

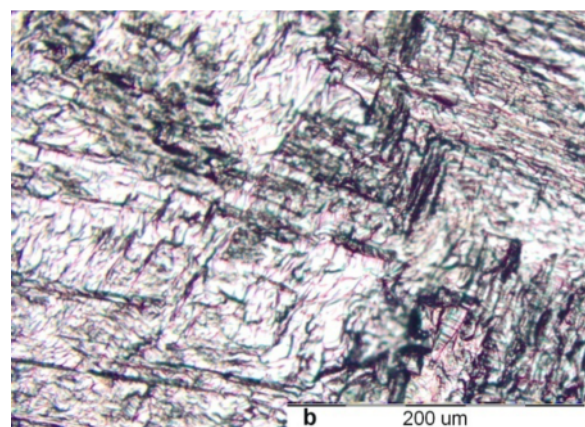
ریز ساختار منطقه HAZ نشان می‌دهد که در منطقه گرما دیده هر سه فازهای α ، α' و β وجود دارند. همچنین رشد دانه نیز اتفاق افتاده که نتیجه انتقال حرارت با نرخ کمتر نسبت به فلز جوش می‌باشد. لازم به توجه است که وجود گاز محافظ و همچنین انتقال حرارت فلز جوش به مناطق مجاور باعث می‌شود که نرخ انتقال حرارت در فلز جوش بالاتر از منطقه HAZ باشد. بر این اساس، ریز ساختار در منطقه HAZ بیانگر یک گذار از حالت جوش فلز پایه به ماده منطقه جوش می‌باشد. مقدار فاز مارتنزیتی مشاهده شده در این منطقه، با فاصله گرفتن از خط جوش کاهش یافته و به همان نسبت فاز α افزایش می‌یابد. در هر دو ریز ساختار نشان داده شده در اشکال ۱۲ و ۱۳، جریان گاز محافظ در جوش کاری ۱۸ lit/min بوده است؛ لذا در گرمای ورودی کمتر، دمای حداکثر کاهش یافته که منجر به کاهش اندازه دانه‌ها و کم شدن فاز α' در منطقه HAZ می‌گردد. (دیده می‌شود که اندازه کلی دانه‌ها در نمونه B₂ بزرگتر از نمونه B₁ و تشکیل فاز α' در نمونه B₂ بیشتر از نمونه B₁ می‌باشد) در حالی که در منطقه جوش کماکان فاز مارتنزیتی به طور کامل تشکیل شده است. مطالعه سایر نمونه‌های متالوگرافی نشان داده که تغییرات زیادی در ریزساختار نمونه‌ها وجود ندارد و فاز مارتنزیت α' در همه نمونه‌ها در جهت‌های مختلف تشکیل شده است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، جوش کاری میکروپلازما روی ورق تیتانیوم Ti-3Al-2.5V با ضخامت ۰/۸ mm انجام شده است. برای انجام این جوش کاری از دستگاه جوش GTAW استفاده شده و مشعل خاصی برای این دستگاه طراحی و ساخته شده است که به توسط آن می‌توان جوش میکروپلازما تا شدت جریان ۱۵ آمپر را بدون استفاده از مدار خنک‌کاری توسط مایع انجام داد. بر روی نمونه‌های جوش کاری شده، آزمایش‌های مختلفی اعم از آزمون‌های کشش و خمش، آزمون میکروسختی‌سنجی، آزمون طیف پراش اشعه X، شکست‌نگاری و آزمون متالوگرافی انجام پذیرفته است. بر اساس این آزمایش‌ها، نتایج زیر بدست آمده است.



الف- منطقه HAZ



ب- فلز جوش

شکل ۱۳ نمونه متالوگرافی B₁ با بزرگنمایی 200X

متالوگرافی ماده اصلی شامل دانه‌های فاز α (رنگ روشن) می‌باشد که فاز β (رنگ تیره) در اطراف آنها پراکنده شده است. این ساختار اغلب در مواردی که ماده تیتانیومی به آرامی از دمای استحاله آلوتروپی سرد می‌شود، ایجاد شده و مبین چقرمگی خوب ماده است. در هنگام جوش کاری وقتی دما از دمای فاز بتا بالاتر می‌رود فلز اصلی ذوب شده و فاصله بین دو قطعه را پر می‌کند. در هنگام سرد شدن (بسته به نرخ کاهش درجه حرارت)، فاز بتا به فاز مارتنزیتی تبدیل می‌شود و فاز α' سوزنی شکل با بافت زنبیلی تشکیل می‌شود. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به خوبی وجود فاز مارتنزیتی α' در منطقه جوش دیده می‌شود. این فاز مارتنزیتی، یکی از عوامل افزایش استحکام و سختی ناحیه جوش نسبت به فلز اصلی و منطقه HAZ می‌باشد که در اشکال ۸ و ۹ نمایانده شده است. لازم به ذکر است که فاز β اساساً دارای سختی کمتری نسبت به فاز α بوده و سختی فاز مارتنزیتی α' به مقدار کمی از فاز α بیشتر است. لذا

- [6] Ddonachie M.J. Jr., "Titanium and titanium alloys", American Society for Metals (ASM), Ohio, USA, 1982.
- [7] Akman E., Demir A., Canel T., Sınmazcelik T., "Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 8, 2009, pp. 3705-3713.
- [8] Wang S., Wu X., "Investigation on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy joints with electron beam welding", *Materials and Design*, Vol. 36, 2012, pp. 663-670.
- [9] Fonda R.W., Knipling K.E., "Texture development in near-alpha Ti friction stir welds", *Acta Materialia*, Vol. 58, No. 19, 2010, pp. 6452-6463.
- [10] Yunlian Q., Ju, D., Quan H., Liying Z., "Electron beam welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of titanium sheets", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 280, No. 1, 2000, pp. 177-181.
- [11] Smith D., *Welding and Cutting With Q Plasma Arc*, Welding Skill and Technology (Chapter 15), McGraw Hill International Editions, 1986.
- [12] Javidrad F., Farghadani H., Asgharzadeh A., "Microplasma Arc Welding of AISI 304 Stainless Steel for Use in Aerospace Industries", *Journal of Modares Science and Engineering*, Tarbiat Modares University, Special Issue: Mechanical Engineering, Vol. 31, 1998; pp. 69-77. (In Persian)
- [13] Karimzadeh F., Salehi M., Saatchi A., Meratian M., "Effect of microplasma arc welding process parameters on grain growth and porosity distribution of thin sheet Ti-6Al-4V alloy weldment", *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 20, No. 2, 2005; pp. 205-219.
- [14] Kumar A., Sapp M., Vincelli J., Gupta M. study on laser cleaning and pulsed gas tungsten arc welding of Ti-3Al-2.5V alloy tubes", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 1, 2010, pp. 64-67.
- [15] Heydari M., *Joining of Ti-3Al-2.5V titanium Alloy Thin Sheets using Microplasma Arc Welding: A Study of Mechanical Properties and Microstructural Evolution*, MSc. Dissertation, Center for Postgraduate Studies, Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran, 2012. (In Persian)
- [16] *Thoriated Tungsten Electrodes*, AWS Safety & Health Fact Sheet, No. 27, American Welding Society, USA, 2003.
- [17] Kou S., *Welding metallurgy 2th ed.*, Wiley-Interscience Publishers, USA, 2003.
- [18] Marashei P., *Electron Microscopy and New Emerging Methods for Analysis using Nano Technologies*, Iran Science and Technology Press, Tehran, Iran, 1994. (In Persian)
- ۱- جوش میکروپلازما روی ورق تیتانیومی به میزان گرمای ورودی حساس است. با انجام آزمایشات برای مقادیر مختلف گرمای ورودی، گرمای ورودی در محدوده ۷۶ J/mm تا ۱۴۰ J/mm برای این جوش کاری مناسب می‌باشد.
- ۲- میزان جریان گاز محافظ بر کیفیت جوش و خواص مکانیکی تأثیرگذار است و باید به طور مناسب به صورت تجربی تعیین شود. برای جوش کاری روی نمونه‌های استفاده شده در این تحقیق، گذر حجمی جریان گاز محافظ ۱۸ lit/min مناسب می‌باشد.
- ۳- در اثر جوش میکروپلازما روی ورق مورد نظر، میزان سختی تا حداکثر ۴۰٪ افزایش یافته است که نسبت به سایر روش‌های جوش کاری این میزان افزایش سختی قابل قبول بوده و لذا نیازی به عملیات حرارتی نمی‌باشد.
- ۴- شکست نمونه‌ها از نوع شکست نرم بوده و در فلز اصلی رخ داده است. لذا استنباط می‌شود که جوش مناسب میکروپلازما روی این ماده منجر به تضعیف خواص مکانیکی و تغییر مورفولوژی شکست نمی‌گردد.
- ۵- نتایج آزمون متالوگرافی نشان داد که فازهای α و β در اثر جوش کاری به فاز مارتنزیتی α' تبدیل که در منطقه HAZ و خط جوش رسوب می‌کند. این فاز α' سوزنی شکل روی محدوده خط‌جوش بیشتر از HAZ بوده که نشان‌دهنده تأثیرپذیری آن از نرخ سرد شدن جوش است.

۵- مراجع

- [1] Boyer R.R., "Attributes, characteristics, and applications of titanium and its alloys", *Journal of Materials*, Vol. 62, No. 5, 2010, pp. 21-24.
- [2] Lutjering G., Williams J.C., *Titanium 2th ed.*, Berlin Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 2007.
- [3] Leyens C., Peters M., *Titanium and Titanium Alloys, Fundamentals and Applications*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003.
- [4] Vatanara M., Vatanara M.R., Haghshenas M., "Materials and Their Behavior under Welding", Vol. 2, Welding of Special Metals, Iranian Welding Engineering Research Center, Tehran, Iran, 1996. (In Persian)
- [5] Otani T., *Titanium Welding Technology*, Nippon Steel Technical Report, No. 95, USA, 2007.