علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال دوم، شماره ۱، بهار و تابستان ۹۵، صفحه ۵۶-۴۹

جوشکاری همزن اصطکاکی اتصال غیر هم جنس آلیاژآلومینیوم ۵۰۸۳ و تیتانیوم خالص تجاری

۱- مجتبی صادقی گوغری[۱*]، مسعود شعبانی[۱]، ابراهیم میرزاپور[۱]، مسعود کثیری[۱]، کامران امینی[۲]

۱- مرکزتحقیقات مواد پیشرفته ، دانشکده مهندسی مواد ، واحد نجف آباد ، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک ، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تیران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۸ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۳۹۴/۰۳/۰۶)

چکیده

اتصال تیتانیوم خالص تجاری و آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ در سرعت دورانی ۱۱۲۰ دور بر دقیقه و سرعت پیش‌روی ۵۰ میلیمتر بر دقیقه به صورت لب به لب توسط جوشکاری همزن اصطکاکی با موفقیت در این تحقیق انجام شده است. میکرو ساختار، سختی و آزمون کشش بر روی اتصال مورد بررسی قرار گرفت. ناحیهٔ جوش به صورت مخلوطی کامپوزیتی از ذرات آلومینیوم و تیتانیوم می‌باشد که این ذرات نقش مهمی در افزایش سختی و استحکام کششی ایفا می‌کند. همچنین ناحیهٔ جوش دارای سه ناحیه می‌باشد. سختی در ناحیهٔ جوش برابر ۴۸۰ ویکرز می‌باشد بدین معنی که سختی در این ناحیه نسبت به فلز پایه تیتانیوم و آلومینیوم به ترتیب ۱۶٪ و ۶۰٪ افزایش یافته است که به خاطر ترکیب بین فلزی تیتانیوم-آلومینیوم ایجاد شده در ناحیهٔ جوش می‌باشد.

کلمات کلیدی: تیتانیوم خالص تجاری، آلومینیوم ۳۲۱–H ۵۰۸۳، جوشکاری همزن اصطکاکی، ریزساختار، خواص مکانیکی.

Friction stir welding of dissimilar joint of aluminum alloy 5083 and commercially pure titanium

M. Sadeghi Gogheri[*1], M. Shabani[1], E. Mirzapour[1], M. Kasiri[1], K. Amini[2]

1- Advanced Materials Research Center, Faculty of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Isfahan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tiran Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

(Received 9 March 2016 ; Accepted 26 May 2016)

Abstract

In this study, commercially pure titanium and aluminum alloy 5083 in connection rotational speed of 1120 rpm and a feed rate of 50 mm per minute for butt welding by friction stir welding has been successfully completed. Micro-structure, hardness and tensile test was conducted on the connection. Welding area is a composite of aluminum and titanium particles that the particles plays an important role in increasing hardness and tensile strength. Welding area is also has three areas. Vickers hardness is 480 times the area of

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی msg8789@gmail.com

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

welding means that the hardness in the area of the base metal of titanium and aluminum increased by 16% and 60% for titanium aluminum intermetallic compounds is created in the area is weld.

Keywords: Aluminum 5083, commercially pure titanium, friction stir welding, microstructure, mechanical properties.

۱- مقدمه

جوشکاری هم‌زن اصطکاکی یکی از روش‌های جوشکاری در حالت جامد است که به دلیل دمای پایین در موضع جوش مانع ایجاد عیوبی همچون ترک، اعوجاج و دیگر عیوبی می شود که میتواند درجوشکاری‌های ذوبی اتفاق بیفتد. همچنین علاوه بر این خصوصیات به‌دلیل کاهش حجم عناصر بین فلزی و ضخامت پایین این لایه‌ها روش مناسبی برای اتصال بین مواد غیر همجنس می‌تواند باشد. از جمله پارامترهای موثر بر این فرآیند شکل و هندسه ایزار، سرعت دورانی، سرعت پیشروی، عمق نفوذ وتعداد پاس‌های فرآیند می باشد [۱].

آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ که در آن منیزیم عنصر آلیاژی اصلی می باشد یک محلول جامد استحکام دهی شده است. این آلیاژ ویژگی‌های جوش پذیری مناسب و مقاومت به خوردگی بالایی از خود نشان داده و به همین علت در محیط‌های دریایی کاربرد دارد. در آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ عنصر منیزیم موجب استحکام بخشی از طریق ایجاد محلول جامد و افزایش نرخ کارسختی (که مهم‌ترین مکانیزم استحکام‌دهی در این آلیاژ است) می شود. عنصر منیزیم نیز موجب افزایش دمای تبلور مجدد و همچنین تکمیل اثر استحکام بخشی منیزیم می‌گردد [۲].

تیتانیوم و آلیاژهای آن دارای استحکام ویژه بالا و مقاومت به خوردگی خوب بوده و در نتیجه این دو ویژگی مطلوب به طور گسترده‌ای در صنایع هوافضا، شیمیایی و هسته ای مورد استفاده قرار می گیرند. با افزایش استفاده تیتانیوم اتصال آن به آلیاژهای آن نیز روز به روز مهم تر گردید. کابرد روش های جوشکاری ذوبی مرسوم در رابطه با تیتانیوم منجر به تشکیل ساختار ریختگی ترد، اعوجاج و تنش های پسماند بالا می‌گردد. بنابراین روش های اتصال حالت جامد به منظور پرهیز از مشکلات ناشی از ذوب و انجماد مناسب تر می باشد [۳].

یوهوآ و همکاران بر روی مشخصات فصل مشترک حاصل از جوشکاری هم‌زن اصطکاکی آلومینیم به تیتانیوم مطالعه نمودند، فصل مشترک اتصال تیتانیوم به آلومینیوم با تغییر پارامترها به شدت تغییر می کند. سختی در ناحیهٔ جوش ۵۰۲ ویکرز اعلام گردید که دو برابر بیش‌تر از آلیاژ تیتانیوم و ۴ برابر بیش‌تر از آلیاژ آلومینیوم بود.که این افزایش سختی به خاطر ایجاد ترکیب بین فلزی تیتانیوم –آلومینیوم در ناحیهٔ جوش می‌باشد [۴].

چن و همکاران ویژگی‌های فصل مشترک اتصال غیر هم جنس و لبه روی هم تیتانیوم به آلومینیوم که با فرآیند جوشکاری هم‌زن اصطکاکی صورت گرفته بود را مورد بررسی قرار دادند. خواص مکانیکی اتصال نشأت گرفته از حضور ترکیبات بین فلزی است. نیروی شکست تمامی اتصالات پایین‌تر از نیروی شکست فلزات پایه بوده و شکست در تمامی اتصالات از فصل مشترک جوش روی داده است. بیشترین نیروی شکست برابر با 9.39KN بوده است که مربوط به نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیش‌روی ۹۰ میلیمتر بر دقیقه می‌باشد [۵].

دسلر و همکاران اتصال لب به لب آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ و تیتانیوم را به روش هم‌زن اصطکاکی مورد بررسی قرار دادند، پارامترهای بهینه جوشکاری در سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی۸۰ میلیمتر بر دقیقه به دست آمد. منطقهٔ هم‌زده به صورت مخلوطی از لایهٔ تبلورمجدد یافته آلومینیوم و ذرات تیتانیوم بود. استحکام کششی ٪ ۷۳ بیشتر از فلز پایهٔ آلومینیوم ۲۰۲۴ بود که به خاطر ایجاد ترکیب آلومینیوم- تیتانیوم در ناحیهٔ جوش می‌باشد [۶].

باتوجه به تحقیقات کمی که در خصوص اتصال غیر هم‌جنس تیتانیوم خالص تجاری به آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به روش هم‌زن اصطکاکی انجام شده است، در تحقیق حاضر تأثیر جوشکاری با

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

سرعت دوران ۱۱۲۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۵۰ میلیمتر بر دقیقه به صورت لب به لب بر روی سختی، استحکام کششی و ریزساختار اتصال غیر هم‌جنس تیتانیوم خالص تجاری و آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ بررسی می‌گردد.

۲-روش تحقیق

آلیاژهای مورد استفاده در این تحقیق ورق آلیاژ تیتانیوم خالص تجاری و آلومینیوم H-۳۲۱ ۵۰۸۳ با ترکیب نمونه مطابق جدول(۱و۲) با ضخامت ۳ میلی‌متر تهیه گردید. از ورق‌های مذکور، قطعاتی با طول ۱۲۰ و عرض ۶۰ میلی‌متر بریده شد. سپس به منظور حذف چربی و آلودگی‌های سطحی، ورق‌ها در محلول استن و الکل شستشو و در دستگاه التراسونیک تمیزکاری شدند.

شکل هندسی و ابعاد ابزار مهمترین و تأثیرگذارترین متغیر فرآیند جوشکاری همزن اصطکاکی می‌باشد، به گونه‌ای که مواردی اعم از خواص جوش، میزان انرژی مصرفی، نوع دستگاه مورد استفاده، سرعت فرآیند و غیره تابع ابزار مورد استفاده می‌باشند [۸]. جهت اتصال آلیاژ تیتانیم به آلومینیوم به روش جوشکاری همزن اصطکاکی بهترین شکل ابزار پین استفاده از ابزار مخروطی شکل می باشد. طرح اتصال در تحقیق حاضر به صورت لب به لب که شماتیک آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

پس از انجام اتصال به روش همزن اصطکاکی، نمونه ها با فرآیندهای رایج سمباده زنی و پولیش آماده سازی در محلول با ترکیب ٪۲ حجمی اسید فلوئوریدریک، ٪۴ حجمی اسید نیتریک و٪۹۴ حجمی آب به مدت ۴۰ ثانیه اچ و توسط میکروسکوپ نوری مدل Nikon و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل LEO 435 VP تحت بررسی ساختاری قرار گرفتند.

برای اندازه‌گیری سختی از روش ویکرز با نیروی ۹/۸ N و مدت زمان اعمال نیرو، ۱۰ ثانیه استفاده شد. سختی از مقطع عرضی و در نه نقطه برای هر نمونه انجام و با میانگین‌گیری، عدد سختی گزارش گردید.

برای شناسایی ترکیبات بین فلزی از دستگاه آنالیز اشعه ایکس[1] مدل PHILIPS PW3040 استفاده گردید.

برای انجام آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTME8M [۹]، تعداد ۳ نمونه با ابعاد ذکر شده در شکل ۳ تهیه و با سرعت ۲ mm/min توسط دستگاه مدل Instrom 4486 تحت آزمون کشش قرار گرفتند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریز ساختار

در این قسمت به بررسی ریز ساختار در فلز خالص تیتانیوم، آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ و ناحیهٔ جوش در اتصال غیر هم‌جنس پرداخته می‌شود.

۳-۱-۱- ریزساختار آلومینیوم H-۳۲۱ ۵۰۸۳

در شکل ۴ الف و ب تصویر به دست آمده از ریزساختار آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی آورده شده است. بررسی تصاویر حاکی از حضور سه ناحیهٔ هم‌زده(SZ)، ناحیهٔ متأثر از عملیات ترمومکانیکی(TMAZ) و منطقهٔ تحت تأثیر حرارت (HAZ) مشخص گردیده‌اند. ریزساختارناحیهٔ هم‌زده شامل دانه‌های ریز هم محور و تبلور مجدد یافته است. وجود دانه‌های هم محور و تبلور مجدد یافته از خصوصیات بارز جوشکاری همزن اصطکاکی است که توسط دیگرمحققین نیز گزارش شده است[۱۰]. دلیل تشکیل این دانه‌ها در ارتباط با تغییر شکل پلاستیک شدید ناشی از حرکت دورانی و پیش‌رونده ابزار و به دنبال آن وقوع پدیده تبلور مجدد دینامیکی است [۱۰].

در ناحیهٔ متأثر از عملیات ترمومکانیکی شامل دانه‌های تغییر شکل یافته و کشیده شده مشاهده می‌گردد. در واقع شدت تغییر شکل پلاستیک در این ناحیه به اندازه‌ای نبوده است که در این ناحیه تبلور مجدد دینامیکی رخ دهد و دانه‌ها تنها در مجاورت ناحیهٔ هم‌زده به سمت بالا تغییر شکل پیدا کرده‌اند. در ناحیهٔ متأثر از حرارت، ماده در نتیجه سیکل حرارتی وارد شده از نظر

[1] X-Ray Diffraction

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

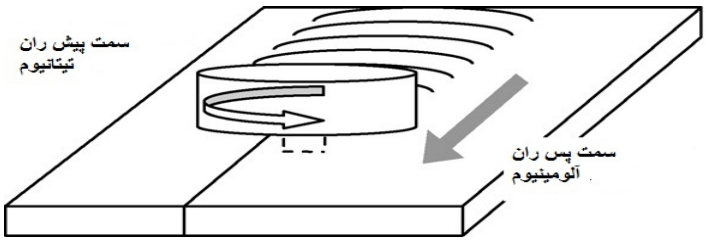
جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ تیتانیوم خالص تجاری(بر حسب درصد وزنی)

Al	V	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Nb	Sn	Zr	Si	Ti
۰/۰۱	<۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	<۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۱	پایه

جدول ۲- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ H–۳۲۱ (بر حسب درصد وزنی)

Zn	V	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Nb	Sn	Si	Mg	Al
۰/۰۱۰۴	۰/۰۱۲۰	۰/۰۶۰۵	۰/۰۵۰۳	۰/۲۹۲	۰/۴۲۸	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۱۰۰	۰/۱۱۷	۴/۱۹	پایه

ریزساختار و خواص مکانیکی تغییر یافته است بدون اینکه دچار تغییر شکل مکانیکی شده باشد [۱۰].



شکل۲- طرح اتصال استفاده شده برای انجام جوشکاری

۳-۱-۲- ریزساختار تیتانیوم

ریزساختار این ناحیه در شکل ۵ الف و ب توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی آورده شده است. بررسی تصاویر حاکی از وجود یک مرز تند بین ناحیهٔ هم‌زده و ناحیهٔ متأثر از حرارت و لذا عدم وجود ناحیهٔ متأثر از عملیات ترمومکانیکی می باشد. دلیل این مسأله در ارتباط با قابلیت هدایت حرارتی پایین تیتانیوم است که باعث عدم پخش حرارت در فرآیند جوش می‌گردد. و لذا نواحی سرد و مستحکم‌تر اطراف ناحیهٔ جوش در مقابل تغییر فرمی که ایجاد کننده ناحیهٔ متأثر از عملیات ترمودینامیکی است مقاومت می‌کند. این نتیجه یعنی عدم وجود منطقهٔ متأثر از عملیات ترمومکانیکی در تیتانیوم و آلیاژهای آن، توسط سایر محققان نیز گزارش شده است [۲-۱۱-۱۲-۱۳-۱۴]. در ناحیهٔ متأثر از حرارت، ماده در نتیجه سیکل حرارتی وارد شده از نظر ریزساختار و خواص مکانیکی تغییر یافته است بدون اینکه دچار تغییر شکل مکانیکی شده باشد و دارای دانه‌های ریزتری نسبت به فلز پایه است.

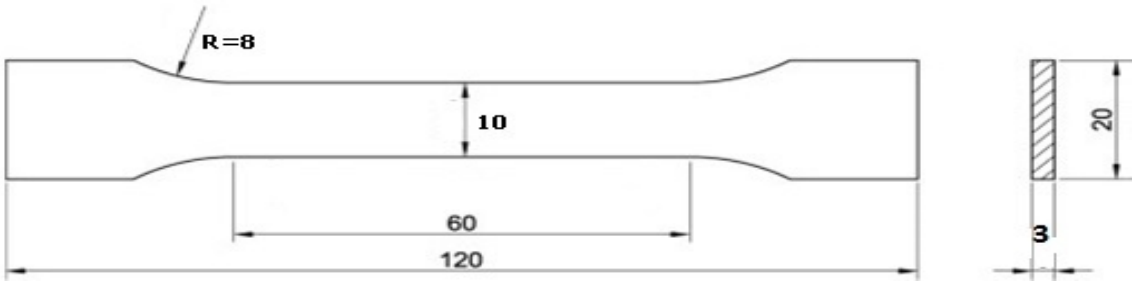
۳-۱-۳- ناحیه جوش

ریز ساختار ناحیهٔ جوش در شکل ۶ الف وب توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی آورده شده است. همان‌گونه که به وضوح مشخص است منطقهٔ فصل مشترک دارای ۳ ناحیهٔ متفاوت است که به صورت نواحی ۱، ۲ و ۳ مشخص شده است. همانطور که در ناحیهٔ ۳ مشاهده می شود این قسمت از بخش های تیره و روشن تشکیل شده است. در این ناحیه فلز پایه تیتانیوم و آلیاژ آلومینیوم با نسبتی نزدیک به ۱:۱ وجود دارند که نشان دهنده ایجاد ترکیب بین فلزی تیتانیوم و آلومینیوم در این منطقه است [۵]. مورفولوژی ناحیهٔ ۱ یک ساختار سیاه رنگ دارد که نوع و میزان عناصر موجود در آن بسیار نزدیک به فلز آلومینیوم می باشد و این‌گونه قابل توضیح است که لایه های آلیاژ آلومینیوم توسط نیروی پین وارد فصل مشترک شده اند. عنصر اصلی در لایهٔ ۲ تیتانیوم است که در آن مقدار کمی آلومینیوم بصورت ذرات پراکنده وجود دارد.

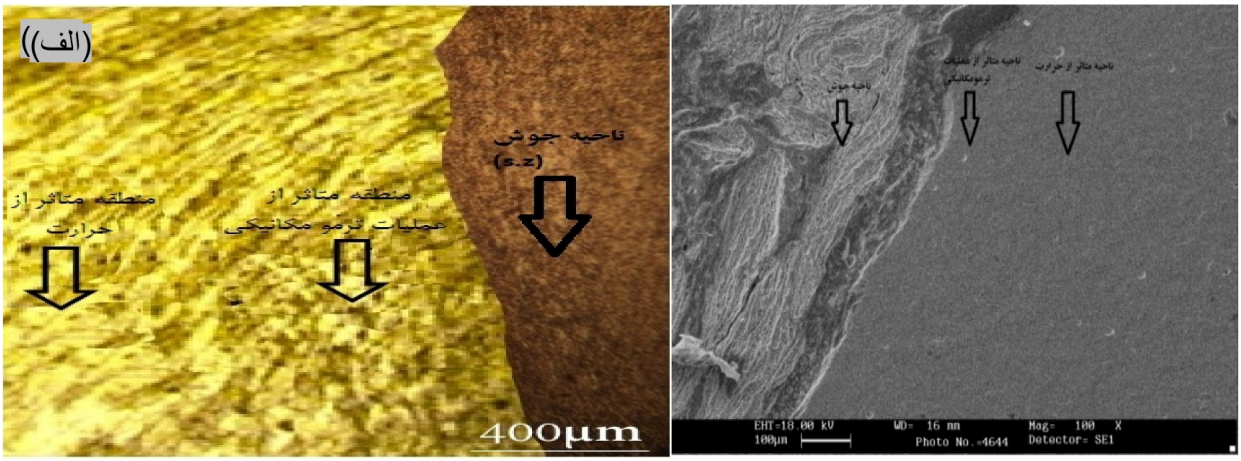
۳-۲- سختی سنجی

نتایج حاصل از سختی سنجی نمونه جوشکاری شده در شکل۷ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در همه جوش ها، ناحیهٔ هم‌زده دارای سختی بالاتری نسبت به ناحیهٔ متأثر از حرارت می باشد و فلز پایه دارای کمترین سختی می باشد. دلیل این امر به‌خاطر تغییر شکل پلاستیکی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل۳- ابعاد نمونه جهت انجام آزمون کشش [۹]



شکل ۴- الف) تصویر بدست آمده از میکروسکوپ نوری و ب) تصویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه جوشکاری شده

بوجود آمده در ناحیهٔ همزده و ناحیهٔ متأثر از حرارت و همچنین ریزتر بودن ساختار بـه‌دلیـل تبلـور مجـدد دینـامیکی در ناحیـهٔ هم‌زده نسبت به فلز پایه می باشد. نتـایج نشـان داد سـختی در ناحیهٔ اتصال ۴۸۰ ویکرز است بدین معنی کـه سـختی در ایـن ناحیه نسبت به فلز پایه تیتـانیوم و آلومینیـوم بـه ترتیـب ٪۱۶ و ٪۶۰ افزایش یافته است. افزایش سختی توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است [۱۴-۱۵]. به عنوان مثال کیتامورو نشـان داد ریزتر شدن ساختار باعث افزایش استحکام می گردد، سختی نیز با استحکام ارتباط مستقیم دارد، و چون در ناحیهٔ هم‌زده دانه‌هـا اندازه کمتری دارند بنابراین سختی در ناحیهٔ هم‌زده افزایش مـی یابد [۱۳]. همچنین یوهوآ نشان داد در ناحیه هم‌زده مخلـوطی از آلومینیوم و تیتانیوم تشکیل می شود که یک ترکیب بین فلزی می باشد و باعث افزایش سختی می گردد وسختی در این ناحیه به ۵۰۲ ویکرز رسیده است [۵].

در قسمت تیتانیوم، کمترین سـختی مربـوط بـه ناحیـهٔ متـأثر از حرارت می باشد با سختی ۲۸۰ ویکرز که این امر به دلیل تأثیر حرارت آنیل شدن در اثر فرآیند می باشد که موجب نرم شـدن این ناحیه نسبت به فلز پایه می گردد [۵].

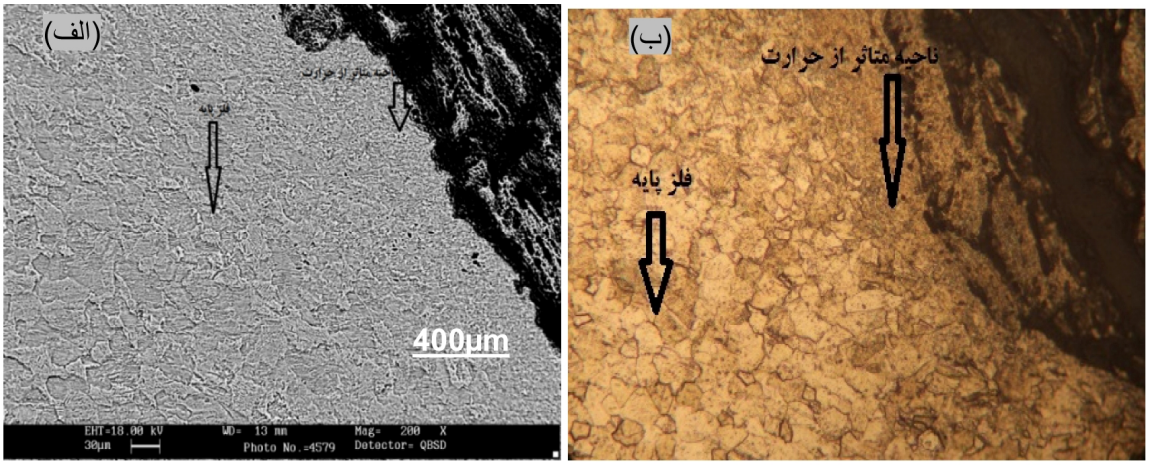
نتایج مربوط به پراش پرتو ایکس در شـکل ۸ نشـان داده شـده است. همانگونه که مشاهده می گردد انواع ترکیبات بـین فلـزی ایجاد شده بین تیتانیوم و آلومینیوم در آن مشخص شـده و ایـن ترکیبات باعث افزایش سختی می گردند.

۳-۳- بررسی نتایج آزمون کشش

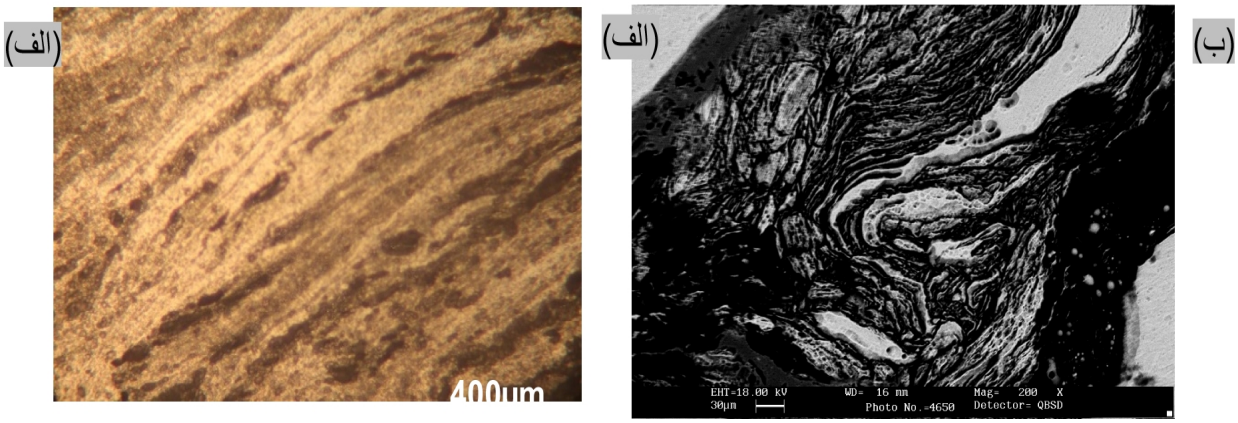
همان طور که در شـکل ۹ مشـخص اسـت اسـتحکام کششـی نمونه ۷۰ مگا پاسکال میباشد که از استحکام فلـزات پایـه کمتـر می‌باشد. دلیل آن به خاطر ایجاد بیش از حد ترکیبات تـرد بـین فازی تیتانیوم-آلومینیوم در محل جوش است که باعث کاهش استحکام کششی نمونهٔ جوشکاری شده است.

در شکل ۱۰ نمونه آزمایش کشش و محل شکسـتن آنهـا نشـان داده می شود با بررسـی سـطح نمونـه مشـخص اسـت کـه در تمامی اتصالات شکست از فصل مشترک جوش رخ داده اسـت

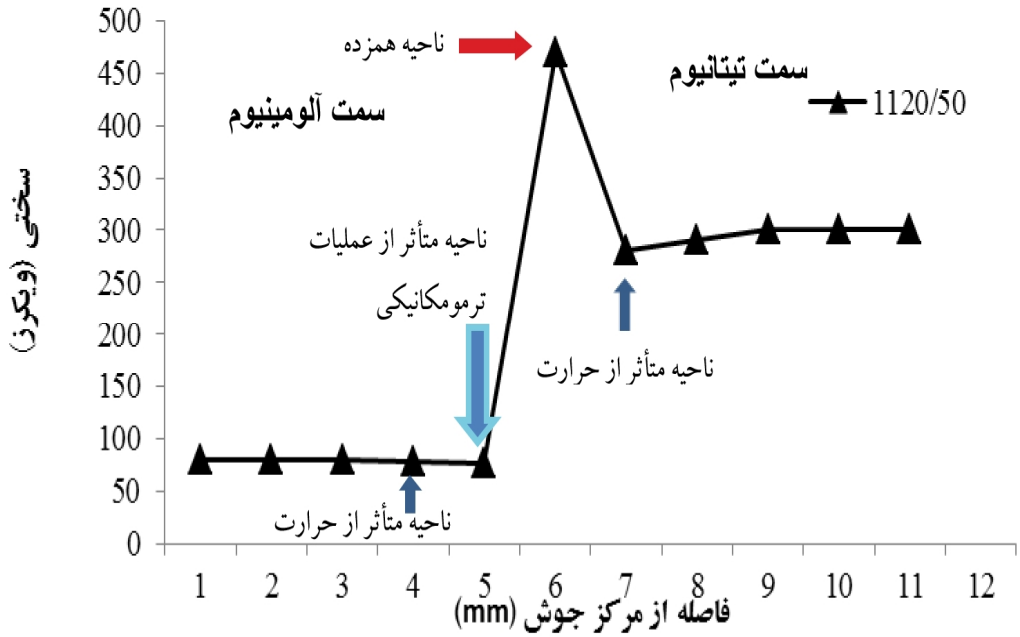
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل۵- الف) تصویر میکروسکوپ نوری و ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ریزساختار تیتانیوم

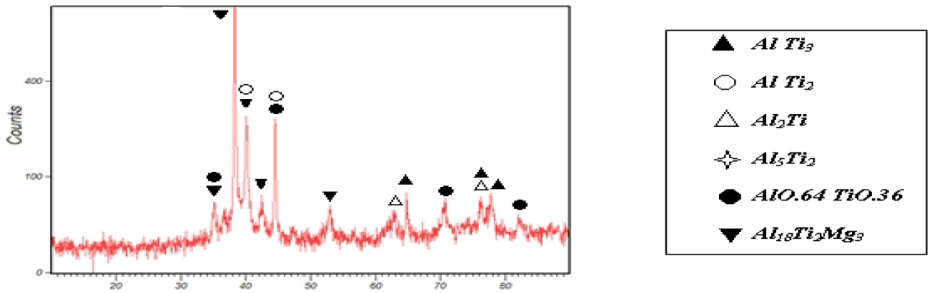


شکل ۶- الف) تصویر میکروسکوپ نوری وب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ناحیهٔ جوش

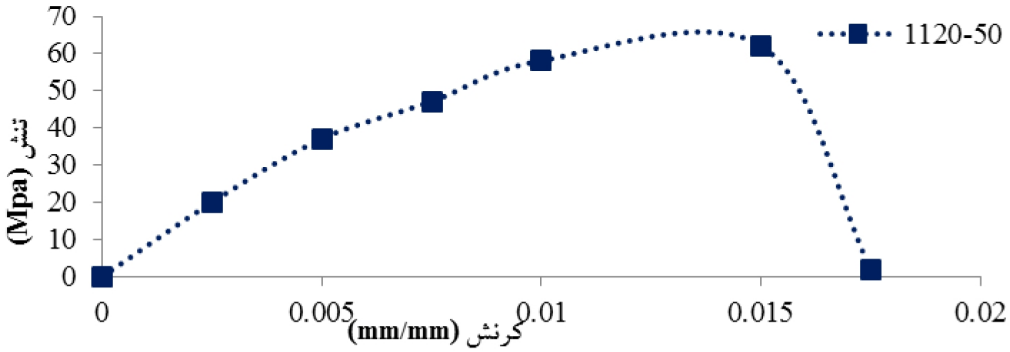


شکل۷- پروفیل سختی با فاصله از مرکز جوش به سمت فلز پایه از طرف تیتانیوم و آلومینیوم

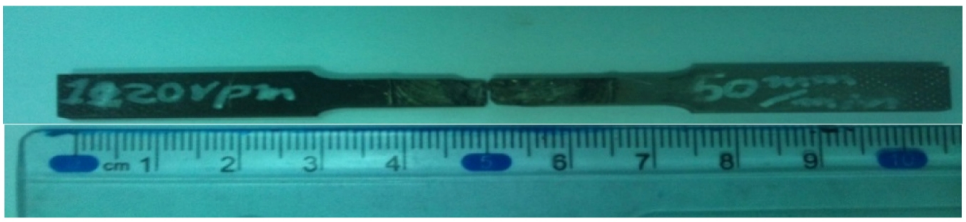
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل۸- نتایج مربوط به پراش پرتو ایکس



شکل ۹- نمودار تنش- کرنش مربوط به آزمون کشش نمونه



شکل ۱۰- تصویر نمونه‌ومحل شکست آن پس از آزمون کشش

و استحکام اتصال پایین تر از استحکام فلزات پایه بوده است. که به دلیل وجود ترکیبات بین فلزی ترد در فصل مشترک اتصال می‌باشد [۶].

۴- نتیجه‌گیری

- اتصال غیر مشابه آلومینیوم ۵۰۸۳ به تیتانیوم خالص تجاری با سرعت دورانی ۱۱۲۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۵۰ میلیمتر بر دقیقه با روش جوشکاری همزن اصطکاکی و به صورت لب به لب با موفقیت در این تحقیق انجام گردید.

- ایجاد ترکیبات بین فلزی تأثیر زیادی بر روی خواص مکانیکی مثل سختی و استحکام کششی می گذارد به طوری که باعث افزایش سختی در ناحیهٔ جوش می گردند. ولی به خاطر ایجاد بیش از حد این ترکیبات بین فلزی در ناحیهٔ جوش باعث کاهش استحکام کششی می شود.

- در فرآیند جوشکاری همزن اصطکاکی بین آلیاژ آلومینیوم H5083-321 و تیتانیوم خالص تجاری، در سمت آلومینیوم منطقه اتصال شامل ناحیهٔ همزده، ناحیهٔ متأثر از عملیات ترمومکانیکی و ناحیهٔ متأثر از حرارت می باشد و در سمت تیتانیوم منطقهٔ متأثر از عملیات ترمومکانیکی تشکیل نمی شود.

- در ناحیهٔ همزده، ریزساختار جوش شامل ۳ ناحیه می باشد،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

که یک ناحیه مربوط به فلز پایه آلومینیوم، ناحیهٔ دوم مربوط بـه فلز پایه تیتانیوم و ناحیهٔ سوم یک مخلوط مکانیکی از آلومینیوم و تیتانیوم است.

منابع

1- Berndt, P. R., Neethling, J. H., Lombard, H., James, M.N., Hattingh, D. H., "Microstructural Characterization of Precipitates in Al 5083-H321", Materials and Design, Vol. 335,pp. 229-435, 2005.

2- Lee, W. B., Lee, C. Y., Chang, W. S., Yeon, Y. M., Jung, S. B., "Microstructural Investigation of Friction Stir Welded Pure Titanium", Materials Letters, vol. 59, pp. 3315–318, 2005.

3- David, A., Feng, Z., "Friction Stir Welding of Advanced Materials", Materials Science and Engineering A, vol. 252, pp. 2025, 2004.

4- Uzun, H., Donne, C. D., Argagnotto, A., Ghidini, Gambaro, T. C., "Friction Stir Welding of Dissimilar Al 6013-T4 To X5CrNi18-10 Stainless Steel", Materials and Design, Vol. 26, pp. 41-46, 2005.

5- Hua, C. Y., Qua, N., Ming, K. L, "Interface characteristic of friction stir welding lap joints of Ti/Al dissimilar alloys", Trans Nonferrous Met Soc, China, vol. 22, pp. 299-304, 2011.

6- Chen, Y.C., Nakata, K., "Microstructural Characterization and Mechanical Properties in Friction Stir Welding of Aluminum and Titanium Dissimilar Alloys", Materials and Design, Vol. 30, pp. 469-474, 2009.

7- Dressler, U., Biallas, G., Mercado. U. A., "Friction stir welding of titanium alloy TiAl6V4 to aluminum alloy AA2024-T3", Materials Science and Engineering A, Vol. 526, pp. 113–117, 2009.

8- fari, A., Batalha, G. F., Prados, E. F., Magnabosco, R., Delijaicove, S., "Tool Wear Evaluations In Friction Stir Processing Of Commercial Titanium Ti-6Al_4V", Wear Journal, Vol. 302, pp. 1327-1333, 2013.

9- American Society for Testing and Materials (ASTM), Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, 2004.

10- Mishra, R. S., Ma, Z. Y., "Friction Stir Welding and Processing", Material Science and Engineering, R. 50, pp.1-78, 2005.

11- Abbasi, M., Karimzadeh, F., Enayati, M. H., "Effects of Friction Stir Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Powder Metallurgy Parts", Journal of Advanced Materials and Processing, Vol. 4, No. 1, pp. 38-55, 2016.

11- Zhang, Y., Sato, Y. S., Kokawa, H., Park, S. H. C., Hirano, S., "Stir Zone Microstructure of Commercial Purity Titanium Friction Stir Welded Using PCBN tool", Materials Science and Engineering A, Vol. 488, pp. 25-30, 2008.

12- Liu, H. J., Zhou, L., Liu, Q. W., "Microstructural characteristics and mechanical Properties of Friction stir Welded joints of Ti-6Al-4V titanium alloy", Materials and Design , Vol. 31, Issue 3, pp. 1650-1655 , 2010.

13- Zhou, L., Liu, H. J., Liu, Q. W., "Effect Of Rotation Speed On Microstructural And Mechanical Properties Of Ti-6Al-4V Friction Stir Welded Joints titanium", Materials and Design, Vol. 31, pp. 2631-2636, 2010.

14- Kitamura, K., Fujii, H., Iwata, Y., Sun, Y. S., Morisada, Y., "Flexible Control of the Microstructural and mechanical Properties of Friction stir Welded of Ti-6Al-4V joints", Materials and Design, Vol. 46, pp. 348-354, 2012.

15- Kulekci, M. K., Esmi, U., Er, O., "Experimental Comparison of Resistance Spot Welding And Friction Stir Spot Welding Processes For The EN AW 5005 Aluminum Alloy", Materials and Technology, Vol. 45, pp. 395-399, 2011.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]