بررسی نسبت سرعت دوران به پیشروی ابزار در جوشکاری همزن اصطکاکی اتصال غیر هم‌جنس آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به تیتانیوم خالص تجاری

مجتبی صادقی گوغری[۱]، مسعود کثیری[۲]، کامران امینی*[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد جوشکاری، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، اصفهان، ایران

۲- استادیار، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، اصفهان، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد تیران، دانشگاه آزاد اسلامی،تیران، اصفهان، ایران

*k_amini@iautiran.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۲/۱۴، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۶/۲۵)

چکیده

جوشکاری همزن اصطکاکی آلیاژهای تیتانیوم با آلومینیوم به خاطر مسائلی ار قبیل سایش ابزار و انتخاب مناسب پارامترهای فرآیند با مشکلات فراوانی همراه است. کنترل مناسب متغیرها جهت بدست آوردن یک جوش سالم و عاری از عیب در جوشکاری اهمیت بسیار زیادی دارد. هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر تغییرات سرعت دوران و پیش‌روی ابزار بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال در جوشکاری همزن اصطکاکی آلیاژهای تیتانیوم خالص تجاری و آلومینیوم H۳۲۱ - ۵۰۸۳ است. به همین منظور میکرو ساختار، سختی و آزمون کشش بر روی اتصال مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که نسبت سرعت دورانی به سرعت پیشروی ابزار پارامتر اساسی در تعیین استحکام و ریزساختار نهایی جوش می‌باشد و بهترین نتیجه برای ریزساختار، سختی و نتایج آزمون کشش در نسبت بهینه ۲۲/۴، که مربوط به سرعت دورانی ۱۱۲۰ و سرعت پیشروی ۵۰ می‌باشد، حاصل شد و کاهش یا افزایش از این نسبت بهینه باعث کاهش استحکام و سختی می‌گردد. سختی در ناحیهٔ جوش برابر ۴۸۰ ویکرز است بدین معنی که سختی در این ناحیه نسبت به فلز پایه تیتانیوم وآلومینیوم به ترتیب ٪ ۱۶ و٪۶۰ افزایش یافته است که به دلیل ترکیب بین فلزی تیتانیوم- آلومینیوم ایجاد شده در ناحیهٔ جوش است. استحکام جوش به دست آمده در این نسبت بهینه نیز برابر ٪۲۰ استحکام فلز پایه آلومنیوم است.

واژه های کلیدی:

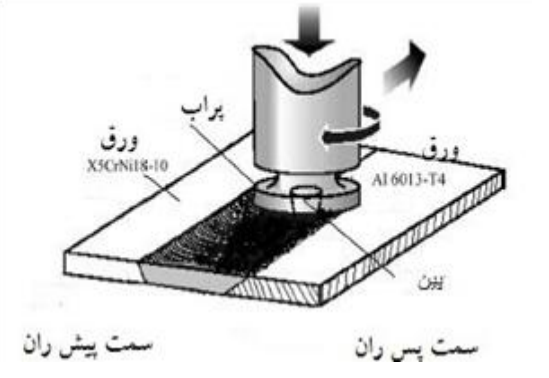
اتصال غیرهم‌جنس، آلیاژ آلومینیوم-تیتانیوم، جوشکاری همزن اصطکاکی، خواص مکانیکی و ساختار میکروسکوپی.

۱- مقدمه

روش جوشکاری همزن اصطکاکی در اواخر سال ۱۹۹۱ توسط انستیتو جوش انگلستان[۱] ابداع شد و به خاطر پتانسیل‌ها و مزایای بالای این روش، شامل جوشکاری فلزات در فاز جامد و عدم استفاده از فلز پرکننده بسیار مورد توجه قرار گرفت. به طوری که در حال حاضر در مورد آلومینیم و آلیاژهای آن معمول بوده و کمپانی‌های معروفی مانند ایساب[۲] این تکنیک را در تولید

محصولات خود به کار می‌برند. این فرآیند هم برای کارهای عادی و روزمره وهم به‌منظور کارهای حساس و بحرانی به‌کار می‌رود. در صورت یافتن ابزار مناسب، این فرآیند می‌تواند برای اتصال انواع زیادی از مواد به کار رود. موفق ترین استفاده از این فرآیند جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم عملیات حرارتی پذیر بوده است، آلیاژهایی‌که از طریق روش های جوشکاری ذوبی به راحتی اتصال نمی‌یابندکه از آن جمله آلیاژهای سری 2XXX، 6XXX و 7XXX را می‌توان نام برد [۱].

مفهوم ابتدایی جوشکاری همزن اصطکاکی بسیار ساده است، بدین صورت که یک ابزار غیر مصرفی چرخشی که شامل یک پین و شانه هم محور است، به داخل لبه های مجاور صفحات یا ورق‌هایی که باید به هم جوش بخورند، وارد شده و سپس در امتداد خط اتصال حرکت می کند. جوش ایجاد شده با این روش در نتیجهٔ حرارت ناشی از اصطکاک و تغییر شکل مکانیکی ایجاد شده توسط ابزار در حال چرخش است. حداکثر دمایی که به این طریق به دست می‌آید مانند اغلب فرآیندهای خانواده جوشکاری اصطکاکی در حدود ۰/۸ دمای ذوب است. شکل ۱ شماتیک جوشکاری همزن اصطکاکی را برای اتصال لب به لب نشان می‌دهد محل تلاقی قسمت استوانه‌ای ابزار با پروب، شانه ابزار نامیده می‌شود شکل(۱) تعاریف فرآیند را برای ابزار و قطعه کار نشان می دهد [۲].



شکل(۱): نمایی از فرآیند همزن اصطکاکی[۳]

یکی از جدیدترین روش های جوشکاری حالت جامد، روش جوشکاری همزن اصطکاکی است. سادگی فرآیند، هزینهٔ پایین تجهیزات، قابلیت اتوماسیون، کیفیت جوش بسیار برتر و سالم‌ترنسبت به فرآیندهای ذوبی، حداقل میزان تنش‌های پسماند و اعوجاج و بالاخره خواص مکانیکی مطلوب و نزدیک به فلز پایه سبب شد که این فرآیند به سرعت در بخش‌های مختلف صنعتی به کار گرفته شود [۳].

آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ که در آن منیزیم عنصر آلیاژی اصلی است یک محلول جامد استحکام دهی شده است. این آلیاژ ویژگی‌های جوش‌پذیری 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) می‌شود. عنصر منیزیم نیز موجب افزایش دمای تبلور مجدد و همچنین تکمیل اثر استحکام بخشی منیزیم می‌گردد [۴].

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 هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. با افزایش استفاده تیتانیوم اتصال آن به آلیاژهای آن نیز روز به روز مهم‌تر گردید. کابرد روش‌های جوشکاری ذوبی مرسوم در رابطه با تیتانیوم منجر به تشکیل ساختار ریختگی ترد، اعوجاج و تنش‌های پسماند بالا می‌گردد. بنابراین روش‌های اتصال حالت جامد به منظور پرهیز از مشکلات ناشی از ذوب و انجماد مناسب‌تر می‌باشد [۵].

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 می‌کند. سختی در ناحیهٔ جوش ۵۰۲ ویکرز اعلام گردید که دو برابر بیش‌تر از آلیاژ تیتانیوم و ۴ برابر بیش‌تر از آلیاژ آلومینیوم است. این افزایش سختی به خاطر ایجاد ترکیب بین فلزی تیتانیوم –آلومینیوم در ناحیهٔ جوش است [۶]. چن و همکاران ویژگی‌های فصل مشترک اتصال غیر هم‌جنس 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 KN ۹/۳۹ بوده است که مربوط به نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیش‌روی ۹۰ میلیمتر بر دقیقه است [۷]. 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 پیشروی ۸۰ میلیمتر بر دقیقه انتخاب گردید. 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 است [۸].

بانگ و همکاران تصال لب به لب آلومینیوم ۶۰۶۱ و تیتانیوم را به صورت لب به لب با روش جوشکاری هم‌زن اصطکاکی مورد بررسی قرار دادند. منطقه هم‌زده مخلوطی از دانه‌های تبلور مجدد یافته تیتانیوم – آلومینیوم می‌باشد. سختی در ناحیه هم‌زده ۳۵۰ ویکرز به دست می‌آید. استحکام اتصالات ۱۳۴MPa به دست آمد که ٪ ۳۵ استحکام فلز پایه آلومینیوم است. تمامی اتصالات استحکامی کمتر از فلز پایه دارند. دلیل آن به این خاطر است که نوک پراپ در منطقه‌ای که قرار دارد نمی‌تواند عملیات هم‌زدن را به طور مؤثری انجام دهد [۹].

چن و همکاران به بررسی جوشکاری هم‌زن اصطکاکی آلومینیوم و تیتانیوم به دو صورت لب به لب و لبه روی پرداختند. در حالت لب به لب ایجاد اتصال مشکل است و در سرعت دورانی ۹۵۰ دور بر دقیقه و سرعت پیش‌روی ۱۱۸ میلیمتر بر دقیقه، استحکام جوش ۱۱۳MPa است که بیشترین میزان استحکام در بین نمونه‌ها است. در حالت جوشکاری لبه روی هم، در سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیش‌روی ۶۰ میلیمتر بر دقیقه، استحکام جوش ۴۰MPa حاصل شد. با افزایش سرعت از ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیش روی ۱۵۰ میلیمتر بر دقیقه در طول فصل مشترک در ناحیه هم‌زده ترک به وجود می‌آید [۱۰].

در جوشکاری هم‌زن اصطکاکی، گرمای ورودی ناشی از اصطکاک باعث بازیابی دینامیکی در مناطق مختلف جوش، از جمله ناحیهٔ هم‌زده و ناحیهٔ متأثر از حرارت می‌شود و به دنبال آن خواص مکانیکی کاهش می‌یابد. کاهش گرمای ورودی در جوشکاری هم‌زن اصطکاکی باعث کاهش بازیابی دینامیکی و یا به عبارت دیگر جلوگیری از کاهش دانسیته نابجایی‌ها می‌شود و همین عامل از کاهش قابل توجه استحکام در مناطق مختلف جوش جلوگیری می‌کند.

گرمای ورودی به پارامترهای مختلفی در جوشکاری هم‌زن اصطکاکی وابسته است. از جمله این پارامترها سرعت پیش‌روی و سرعت دورانی ابزار است [۱۱].

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 پارامترهای سرعت‌های دوران و پیشروی مختلف بر روی سختی، استحکام کششی و ریزساختار اتصال غیر هم‌جنس تیتانیوم خالص تجاری و آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ بررسی می‌شود.

۲- روش تحقیق

آلیاژهای مورد استفاده در این تحقیق ورق آلیاژ تیتانیوم خالص تجاری و آلومینیوم H۳۲۱- ۵۰۸۳ می‌باشد که ترکیب شیمیایی این آلیاژها که توسط آزمایش کوانتومتری بدست آمده در جداول ۱ و ۲ و خواص مکانیکی آنها در جداول ۳و ۴ به ترتیب آورده شده است و با ضخامت ۳ میلی‌متر استفاده گردیدند. 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.

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 آلومینیوم۳۲۱ H-۵۰۸۳ (بر حسب درصد وزنی)

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

جدول(۳): خواص مکانیکی آلیاژ تیتانیوم خالص تجاری

سختی(VHN)	ازدیاد طول(%)	استحکام تسلیم(Mpa)	استحکام کششی(Mpa)
۳۰۰	۳۹	۳۲۶	۴۰۱/۶

جدول (۴): خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم۳۲۱ H-۵۰۸۳

سختی(VHN)	ازدیاد طول(%)	استحکام تسلیم(Mpa)	استحکام کششی(Mpa)
۸۰	۱۴/۳	۲۵۳	۳۴۸

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[۳]. جهت اتصال آلیاژ تیتانیم به آلومینیوم به روش جوشکاری همزن اصطکاکی بهترین شکل ابزار پین استفاده از ابزار مخروطی شکل می‌باشد. به همین منظور پین از جنس کاربید تنگستن و شکل بین بصورت مخروط ناقص با قطر قاعده بالای ۶mm و قطر قاعده پایین ۳mm و ارتفاع پین ۲/۶mm در نظر گرفته شده است. طرح اتصال مورد استفاده در این تحقیق به صورت لب به لب[۳] می‌باشد، بنابراین نیازی به آماده‌سازی و پخ-زنی ندارد. دستگاه مورد استفاده جهت انجام جوشکاری، دستگاه فرز مدل۶۱۰ -Tمی‌باشد. که در شکل (۲) نمایی از دستگاه فرز مورد استفاده و نحوهٔ قرار گیری اجزاء در حین جوشکاری نشان داده شده است. تیتانیوم در سمت پیش‌ران و آلومینیوم درسمت پس‌ران قرار داده شد زیرا در این حالت کیفیت جوش‌ها بهتر و اختلاط مواد بهتر صورت می‌گیرد. به منظور بررسی تاثیر پارامترهای جوشکاری همزن اصطکاکی تغییرات سرعت دوران وپیش‌روی ابزار بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال آلیاژهای تیتانیوم خالص تجاری و آلومینیوم H۳۲۱ -۵۰۸۳ ، نمونه هایی در شرایط مختلف (مطابق با جدول ۵) جوشکاری گردید. جوشکاری با زاویه ۳ درجه انجام گردید.

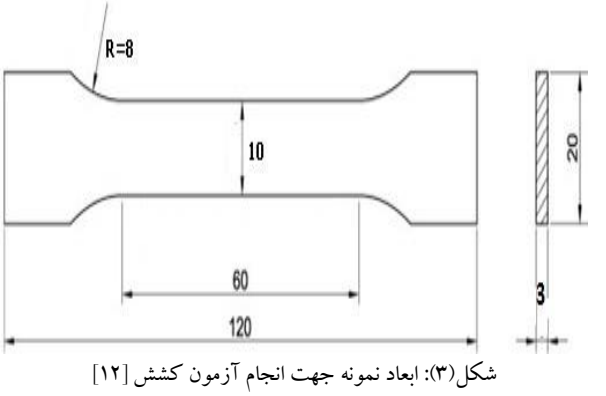
شکل (۲): تصویر دستگاه مورد استفاده و نحوهٔ قرارگیری اجزاء در حین جوشکاری

جدول(۵): پارامترهای در نظر گرفته شده جهت جوشکاری هم‌زن اصطکاکی آلیاژهای تیتانیوم خالص تجاری و آلومینیوم۳۲۱–H ۵۰۸۳

شماره نمونه	سرعت دوران ابزار (rpm)	سرعت پیش روی ابزار (mm/min)	نسبت ω/V
نمونه ۱	۸۰۰	۵۰	۱۶
نمونه ۲	۱۰۰۰	۵۰	۲۰
نمونه ۳	۱۱۲۰	۵۰	۲۲/۴
نمونه ۴	۱۱۲۰	۲۰	۵۶
نمونه ۵	۱۱۲۰	۸۰	۱۴

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 انجام آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTME8M [۱۲]، نمونه‌هایی با ابعاد ذکر شده در شکل ۳ تهیه و با سرعت ۲ mm/min توسط دستگاه مدل Instrom 4486 تحت آزمون کشش قرار گرفتند.



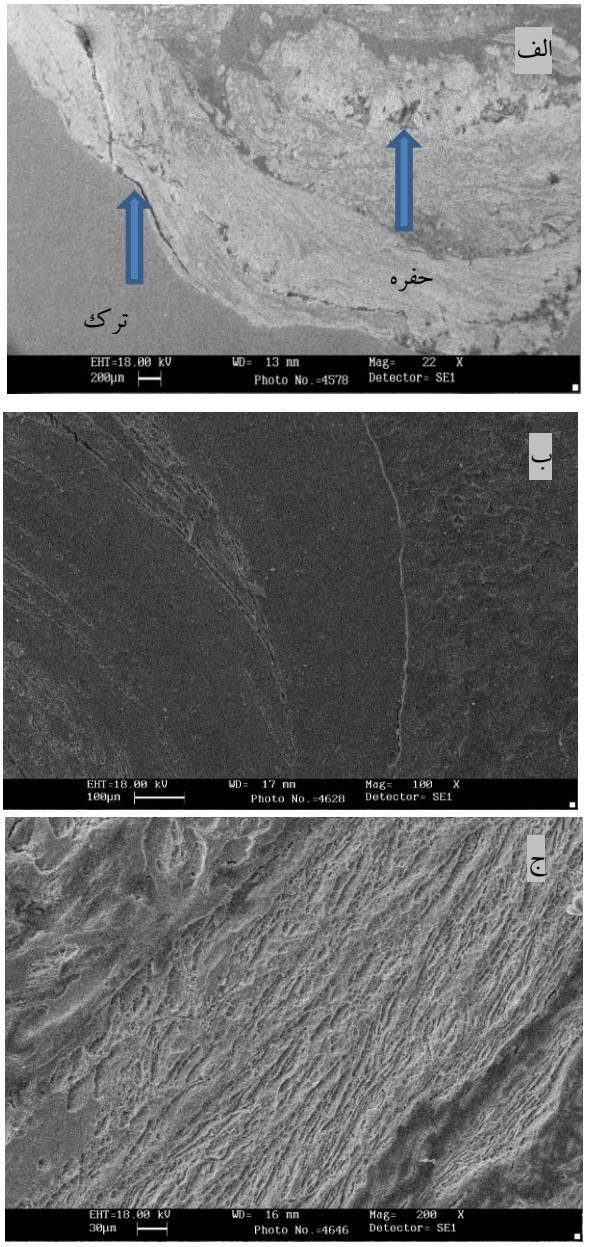
شکل(۳): ابعاد نمونه جهت انجام آزمون کشش [۱۲]

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی اثر تغییرات سرعت دوران

شکل‌های ۴ الف، ب و ج، ساختار ناحیهٔ هم زده نمونه‌های شماره ۱، ۲ و ۳ که سرعت پیشروی در نمونه به صورت ثابت و معادل با ۵۰ میلیمتر بر دقیقه و سرعت دورانی ابزار به ترتیب ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۱۲۰ دور بر دقیقه می‌باشد را نشان می‌دهد. به طور کلی با کاهش سرعت دورانی ابزار و با افزایش سرعت پیش‌روی، گرمای ورودی به منطقه جوش کاهش پیدا می‌کند. بنابراین یکی از راه‌های کاهش گرمای ورودی در جوشکاری، کاهش نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی می‌باشد[۱۳]. اما تحقیقات متعدد نشان می‌دهد که کاهش این نسبت از یک حدی به بعد، دستیابی به یک جوش مناسب و بدون عیب را سخت و گاهی غیر ممکن می‌کند و در نتیجه مقدار بهینه‌ای برای نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی در جوشکاری هم‌زن اصطکاکی بایستی تعیین کرد تا در ضمن اینکه حداقل گرمای ورودی ایجاد شود، اتصالی مناسب از نظر ریزساختاری نیز بدست آید[۱۴]. همانطور که گفته شد نسبت ω/V در جوشکاری هم‌زن اصطکاکی پارامتر بسیار مهم در ایجاد کیفیت و ریزساختار جوش می‌باشد که این نسبت برای نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۱۶، ۲۰ و ۲۲/۴ می‌باشد. در شکل ۴ الف، همان طور که مشاهده می‌شود در ناحیه جوش چندین ترک مشاهده می‌شود که علت اصلی آن نسبت پایین ω/V در فرآیند جوشکاری می‌باشد. زیرا در این شرایط میزان حرارت ورودی به ناحیه جوش پایین بوده و در نتیجه بازیابی دینامیکی و دانسیته نابجایی‌ها کاهش پیدا کرده و استحکام نهایی ناحیه جوش کم می‌شود. در شکل ۴ ب تصویر ناحیه جوش نمونه ۲ دیده می‌شود. در این نمونه همانند نمونهٔ اول در ناحیه جوش حفره و ترک دیده می‌شود ولی بخاطر افزایش نسبت ω/V از ۱۶ به ۲۰، میزان عیوب موجود در ناحیه جوش در نمونه ۲ کمتر است. زیرا در این حالت میزان گرمای ورودی به ناحیه جوش نسبت به نمونه اول بالاتر بوده است. در شکل ۴ ج تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه ۳ مشاهده می‌شود.

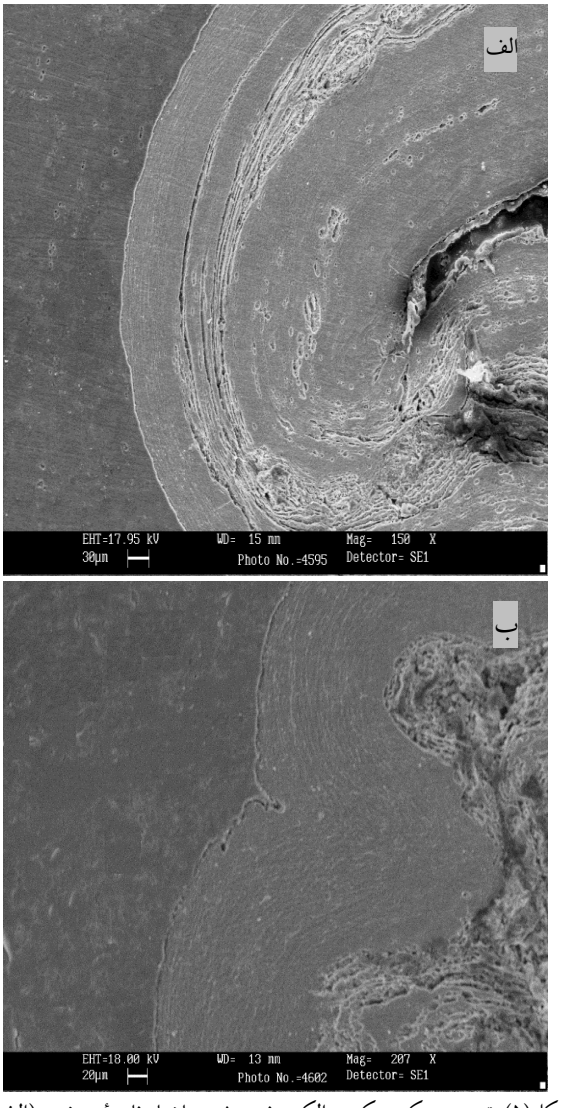
همانطور که قبلا اشاره شد برای نسبت ω / V مقدار بهینه‌ای وجود دارد که در کمتر و بیشتر از آن عیوب در ناحیه جوش مشاهده می‌شود. با انجام آزمایشات این نسبت بهینه ۲۲/۴ گزارش می‌گردد. با توجه به شکل ۴ ج، بهترین حالت ریزساختار ناحیه جوش در این نسبت مشاهده می‌شود.



شکل(۴): تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی ساختار ناحیه هم‌زده: (الف): نمونه با سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه، (ب): نمونه با سرعت دورانی ۱۰۰۰دور بر دقیقه و (ج): نمونه با سرعت ۱۱۲۰ دور بر دقیقه و همگی با سرعت پیشروی ۵۰ میلیمتر بر دقیقه

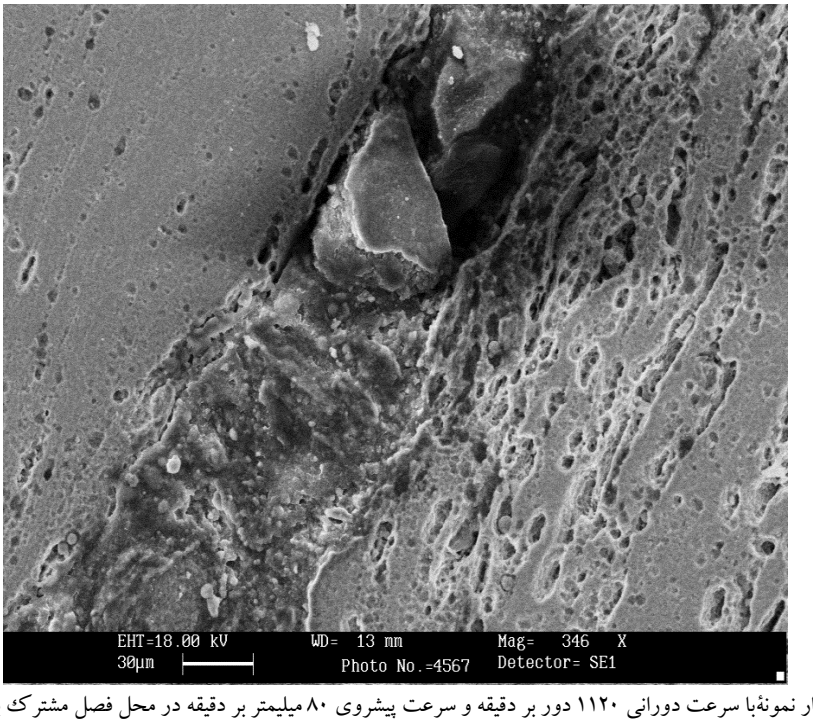
۳-۲- بررسی اثر سرعت پیش‌روی ابزار

شکل ۵ الف و ب تصویر ساختار ناحیهٔ هم‌زده نمونه‌های ۴ و ۵ که سرعت پیشروی در نمونه‌ها به ترتیب ۲۰ و ۸۰ میلیمتر بر دقیقه و سرعت دورانی هر دو نمونه به صورت ثابت و معادل با ۱۱۲۰ دور بر دقیقه می‌باشد را نشان می‌دهد. نسبت ω / V در نمونه‌های ۴ و ۵ به ترتیب ۵۶ و ۱۴ گزارش می‌شودکه در نمونه ۴ این نسبت بیشتر از مقدار بهینه می‌باشد که در این شرایط افزایش بیش از حد دما، سبب اکسیداسیون منیزیم موجود در آلیاژ آلومینیوم گشته و اتصال به خوبی انجام نمی‌گیرد[۶].



شکل(۵): تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی ساختار ناحیهٔ هم‌زده: (الف): نمونه با سرعت پیشروی ۲۰ میلیمتر بر دقیقه، (ب): نمونه با سرعت پیشروی ۸۰ میلیمتر بر دقیقه و هر دو با سرعت دورانی ۱۱۲۰ دور بر دقیقه

در شکل ۶ ساختار نمونهٔ ۵ در محل فصل مشترک با بزرگنمایی بالاتر آورده شده است. در این نمونه به دلیل کم بودن نسبت ω / V نسبت به حالت بهینه، میزان گرمای ورودی به ناحیه جوش کاهش پیدا کرده و در نتیجه حرارت لازم برای ایجاد اتصال تأمین نمی‌شود و همین مسأله باعث ایجاد ترک و حفره در ناحیه جوش می‌گردد.



شکل(۶): ساختار نمونهٔبا سرعت دورانی ۱۱۲۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۸۰ میلیمتر بر دقیقه در محل فصل مشترک با بزرگنمایی بیشتر

۳-۳- سختی سنجی

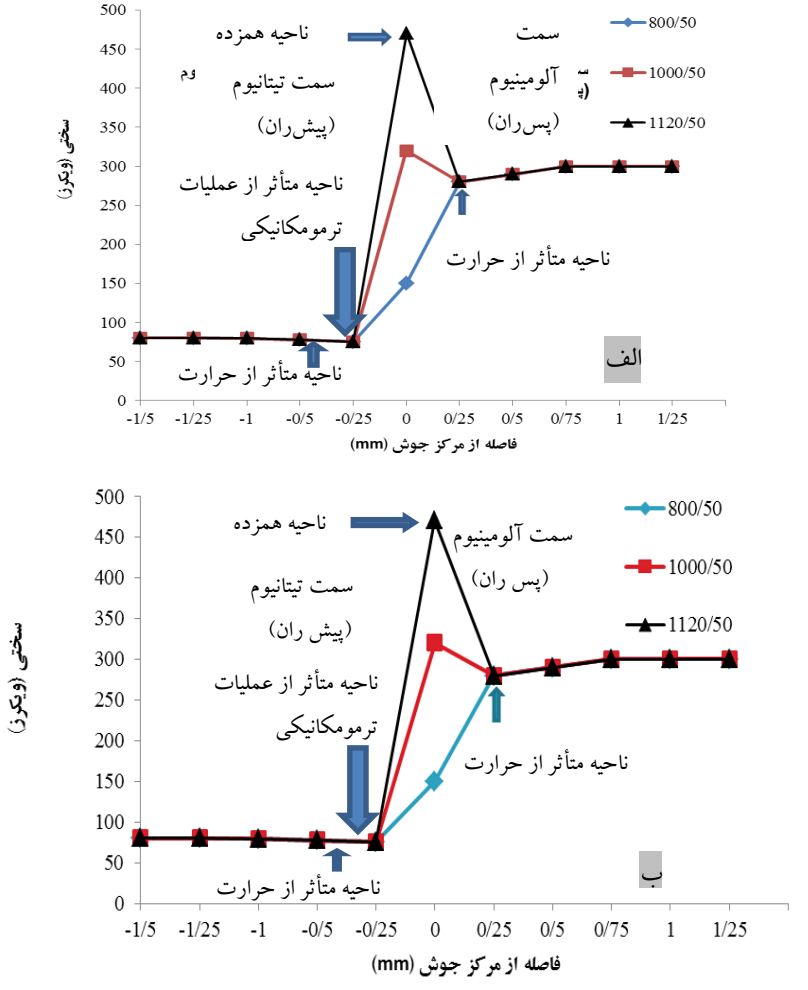
نتایج حاصل از سختی سنجی نمونه جوشکاری شده در شکل ۷ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در همه جوش-ها، ناحیهٔ هم‌زده دارای سختی بالاتری نسبت به ناحیهٔ متأثر از حرارت می‌باشد و فلز پایه دارای کمترین سختی می‌باشد. دلیل این امر به‌خاطر تغییر شکل پلاستیکی بوجود آمده در ناحیهٔ هم زده و ناحیهٔ متأثر از حرارت و همچنین ریزتر بودن ساختار به‌دلیل تبلور مجدد دینامیکی در ناحیهٔ هم‌زده نسبت به فلز پایه می‌باشد. نتایج نشان داد سختی در ناحیهٔ اتصال ۴۸۰ ویکرز است بدین معنی که سختی در این ناحیه نسبت به فلز پایه تیتانیوم و آلومینیوم به ترتیب ٪۱۶ و ٪۶۰ افزایش یافته است. افزایش سختی توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است[۱۵-۱۶].

به عنوان مثال کیتامورو نشان داد ریزتر شدن ساختار باعث افزایش استحکام می‌گردد، سختی نیز با استحکام ارتباط مستقیم دارد و چون در ناحیهٔ هم‌زده دانه‌ها اندازه کمتری دارند، بنابراین سختی در ناحیهٔ هم‌زده افزایش می‌یابد[۱۶].

همچنین یوهوآ نشان داد در ناحیه هم‌زده مخلوطی از آلومینیوم و تیتانیوم تشکیل می‌شود که یک ترکیب بین فلزی می‌باشد و باعث افزایش سختی می‌گردد وسختی در این ناحیه به ۵۰۲ ویکرز رسیده است [۶].

در قسمت تیتانیوم، کمترین سختی مربوط به ناحیهٔ متأثر از حرارت می‌باشد با سختی ۲۸۰ ویکرز که این امر به دلیل تأثیر حرارت آنیل شدن در اثر فرآیند می‌باشد که موجب نرم شدن این ناحیه نسبت به فلز پایه می‌گردد [۶].

در ناحیهٔ همزده مخلوطی از آلومینیوم و تیتانیوم تشکیل می‌شود [۱۷]، که یک ترکیب بین فلزی می‌باشد و باعث افزایش سختی می‌گردد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، افزایش یا کاهش میزان ω / V از مقدار بهینه ۲۲/۴ باعث کاهش میزان سختی در ناحیه جوش می‌شود. زیرا کاهش نسبت بهینه باعث کاهش درجه حرارت ورودی به جوش و کاهش سختی می‌شود. افزایش این نسبت می‌تواند باعث افزایش میزان حرارت ورودی در ناحیهٔ همزده و ناحیهٔ متأثر از حرارت شده و باعث افزایش اندازه دانه‌ها شود، در نتیجه استحکام کاهش پیدا کرده و در نهایت سختی کاهش می‌یابد.

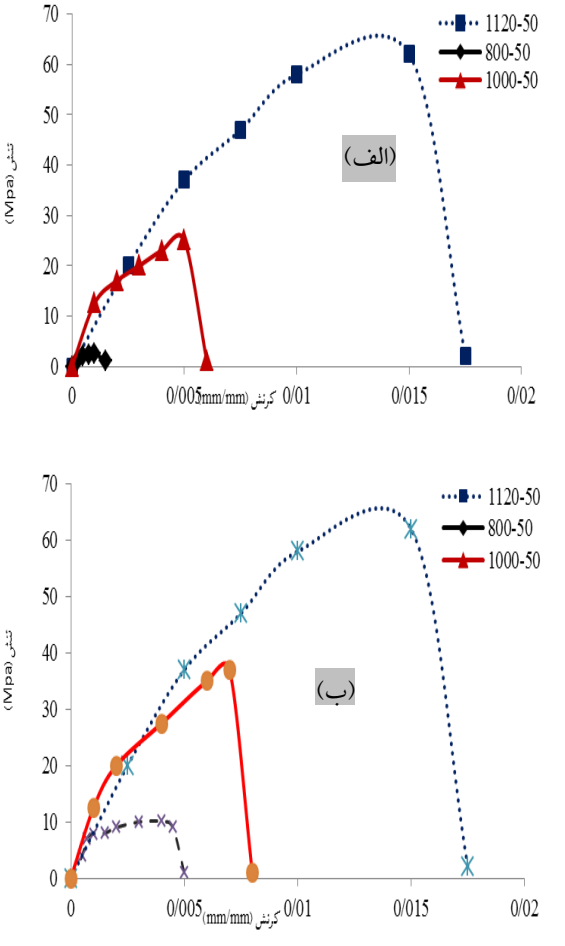


شکل(۷): پروفیل سختی با فاصله از مرکز جوش به سمت فلز پایه از طرف تیتانیوم و آلومینیوم در نمونه‌های: (الف): با سرعت پیشروی متفاوت و (ب): سرعت دورانی متفاوت

۳- ۳- بررسی نتایج آزمون کشش

شکل ۸ الف و ب، نمودار تنش کرنش آزمون کشش نمونه‌های با سرعت پیشروی ثابت و سرعت دوران ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۱۲۰ دور بر دقیقه را نشان می‌دهد. بیشترین میزان استحکام در نمونه با سرعت دوران ۱۱۲۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۵۰ میلیمتر بر دقیقه می‌باشد. استحکام جوش به دست آمده در این نسبت بهینه نیز برابر ٪۲۰ استحکام فلز پایه آلومینیوم است. همانطور که گفته شد مقدار بهینه در این سرعت دوران و پیشروی بدست می‌آید و باعث افزایش استحکام ناحیه جوش می‌شود چرا که در این نسبت بهینه میزان حرارت ورودی به جوش به گونه‌ای است که میزان بیشتری از ذرات تیتانیوم و آلومینیوم در یکدیگر مخلوط شده و باعث افزایش استحکام اتصال می‌گردد. لازم به ذکر

است در سرعت‌های پیشروی کمتر و بیشتر از ۵۰ میلیمتر بر دقیقه استحکام، کاهش پیدا کرده که این مسأله بدلیل کاهش میزان حرارت ورودی به ناحیه جوش می‌باشد. هنگامی که سرعت دوران پین از ۱۱۲۰ دور بر دقیقه کمتر شود، بدلیل گرمای تولیدی کم و ذوب ناقص بین آلومینیوم و تیتانیوم که در فصل مشترک آنها اتفاق می‌افتد، استحکام نمونه کاهش پیدا می‌کند.



شکل(۸): نمودار تنش- کرنش مربوط به آزمون کشش: (الف): نمونه‌های با سرعت پیشروی ثابت و (ب): نمونه‌های با سرعت دوران ثابت

در شکل ۹ نمونه‌های آزمون کشش و محل شکستن آنها نشان داده شده است. با بررسی سطح نمونه‌ها مشخص است که در تمامی اتصالات شکست از فصل مشترک جوش رخ داده است و استحکام تمامی اتصالات پایین‌تر از استحکام فلزات پایه بوده است.

شکل(۹): تصویر نمونه‌ها ومحل شکست آنها پس از آزمون کشش

٤- نتیجه گیری

۱- بیشترین استحکام کششی جوش در نمونه با سرعت دورانی ۱۱۲۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۵۰ میلیمتر بر دقیقه، بدست می‌آید. که این شرایط جوشکاری باعث می‌شود که نسبت سرعت دوران به سرعت پیشروی ۲۲/۴ بدست آید و به عنوان نسبت بهینه معرفی می‌شود.

۲- برای ایجاد اتصال درست بین آلومینیوم و تیتانیوم یک سرعت دورانی به سرعت پیشروی بهینه وجود دارد که کمتر از آن باعث می‌گردد که حرارت لازم برای اتصال تأمین نگردد و بیشتر از آن نیز باعث افزایش بیش از حد دما می‌شود که سبب اکسیداسیون منیزیم موجود در آلیاژ آلومینیوم گشته و اتصال به خوبی انجام نمی‌شود.

۳- در همه جوش‌ها ناحیهٔ هم‌زده دارای سختی بالاتری نسبت به فلز پایه می‌باشد. همچنین منطقهٔ متأثر از حرارت دارای سختی بالاتری نسبت فلز پایه می‌باشد. بیشترین میزان سختی در نسبت بهینه ω / V یعنی ۲۲/۴ بدست آمد که مربوط به نمونه‌ای می‌باشد که با سرعت دوران ۱۱۲۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۵۰ میلیمتر بر دقیقه، جوشکاری می‌گردد.

۴- فصل مشترک اتصال تیتانیوم به آلومینیوم، با تغییر پارامترها به شدت تغییر می‌کند. با افزایش سرعت یا کاهش میزان نسبت ω / V، میزان ذرات آلیاژ تیتانیوم پخش شده در ناحیه هم‌زده تغییر می‌یابد.

۵- خواص مکانیکی اتصال کاملاً نشأت گرفته از حضور ترکیبات بین فلزی است که در این اتصال باعث افزایش خواص مکانیکی اتصال می‌گردد.

۵- مراجع

[1] A .David, Z. Feng, "Friction Stir Welding of Advanced Materials", Materials Science and Engineering A, Vol. 252, pp. 2012-2025, 2004.

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

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

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

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

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

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

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

[9] K. S. Bang, K. J. Lee, H. S. Bang, H. S. Bang, "Interfacial Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Friction Stir Welds between 6061-T6 Aluminum and Ti-6%Al-4%V Alloys", Materials Transactions, Vol. 52, No. 5, pp. 974–978, 2011.

[10] Y .Chen, C .Liu, G .Liu, "Study on the Joining of Titanium and Aluminum Dissimilar Alloys by Friction Stir Welding", The Open Materials Science Journal, Vol. 5, pp. 256–261, 2011.

[11] R. Kumar, K .Singh, S. Pandey, "Process Forces and Heat input as Function of Process Parameters in AA5083 Friction Stir Welds", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 22, pp. 288-298, 2012.

[12] American Society for Testing and Materials (ASTM), Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, 2004.

[13] R. Nandan, T. Debroy, H. K. D. H. Bhadeshna, "Recent Advances in Friction Stir Welding Process WeldMent Structure", Progress in Material Science, Vol. 53, pp. 980-1023, 2008.

[14] M. Movahedi, A. H. Kokabi, S. M. S. Reihani, H. Najafi, "Effect of Tool Travel and Rotation Speeds on Weld Znology Of Welding And Joining", Vol. 17, pp. 162-167, 2012.

[15] L. Zhou, H. J. Liu, Q. W. Liu, "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.

[16] K. Kitamura, H. Fujii, Y. Iwata, Y. S. Sun, Y. Morisada, "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.

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

٦- پی نوشت

[1] TWI
[2] ESAB
[3] Butt Joint