

# تأثیر سرعت چرخش ابزار بر خواص مکانیکی و رفتار خوردگی اتصال غیرهمجنس آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ و تیتانیوم خالص تجاری به روش جوشکاری همزن اصطکاکی

مسعود شعبانی\*<sup>۱</sup>، بهروز شایق بروجنی<sup>۲</sup>، رضا ابراهیمی کهریزسنگی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف  
آباد، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۳- استاد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

\* masoudshabani.1369@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۵/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۳۱)

## چکیده

در این مقاله، تأثیر سرعت چرخش ابزار بر روی خواص مکانیکی و خوردگی اتصال تیتانیوم خالص تجاری و آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳، به روش همزن اصطکاکی، بررسی شده است. ابتدا با جوشکاری‌های مقدماتی محدوده پارامترهای لازم برای دستیابی به اتصال مناسب بدست آمده و سپس با تغییر سرعت چرخش ابزار، خواص مکانیکی و خوردگی نواحی متأثر از حرارت، ناحیه جوش و سطح مقطع جوش به کمک آزمون پلاریزاسیون Tafel و روش طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی، بررسی شده و نتایج حاصل مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که رفتار خوردگی در اتصالات، از سرعت چرخش ابزار تأثیر پذیر بوده و نواحی جوش و متأثر از حرارت، مقاومت در برابر خوردگی ضعیف‌تری نسبت به فلزات پایه داشته‌اند.

## واژه‌های کلیدی:

جوشکاری همزن اصطکاکی، تیتانیوم خالص تجاری، آلومینیوم ۵۰۸۳، خواص مکانیکی، رفتار خوردگی.

## ۱- مقدمه

آلیاژ در صنایع هوافضا، هسته‌ای، دریایی، شیمیایی و پزشکی شده است و این روند به سمت سایر صنایع در حال توسعه می‌باشد [۱]. در آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳، عنصر اصلی آلیاژی منیزیم می‌باشد که موجب استحکام بخشی از طریق ایجاد محلول جامد

تیتانیوم و آلیاژهای آن از جمله فلزات جدید مهندسی هستند که کاربرد آن‌ها به عنوان فلز صنعتی از حدود سال ۱۹۴۰ میلادی شروع شده است. نسبت استحکام به وزن زیاد، مقاومت خوردگی بالا و سازگاری با محیط بدن باعث بکارگیری این

قرار گرفته است [۹-۱۳]. طبق مطالعات صورت گرفته در بسیاری از آلیاژها از قبیل ۲۰۲۴ و ۶۰۶۱ [۹, ۱۱, ۱۴]، ۵۰۸۳ [۸]، ۷۰۷۵ [۱۳] و اتصال مس خالص به آلومینیوم ۵۷۵۴ [۱۵] حساسیت به خوردگی موضعی مشاهده شده است. در برخی موارد حساسیت نسبت به خوردگی با میزان رسوبات و رشد آنها پس از انجام عملیات جوشکاری در ارتباط بوده است [۱۰, ۱۶-۱۸]. مطابق با مطالعات صورت گرفته معمولاً حساسیت به خوردگی در ناحیه جوش بیشتر از سایر نواحی دیده شده است [۹, ۱۰, ۱۹-۲۲]. البته بطور کلی ارتباط قوی و ثابت میان پارامترهای جوشکاری، از جمله سرعت چرخش ابزار و سرعت پیشروی آن، با رفتار خوردگی مشاهده نشده است [۱۸]. در تحقیق حاضر سعی بر آن بوده است که ارتباط بین سرعت چرخش ابزار با رفتار خوردگی نواحی مختلف اتصال غیرهمجنس همزن اصطکاکی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ و تیتانیوم خالص تجاری مورد مطالعه قرار گیرد.

## ۲- مواد و روش انجام تحقیق

### ۲-۱- انجام جوشکاری و بررسی خواص مکانیکی

در این تحقیق از ورق‌های تیتانیوم خالص تجاری و آلیاژ H321-H321 ساخت کشور یونان و با ضخامت ۳ میلی‌متر استفاده شده است. ترکیب شیمیایی آلیاژها، که با استفاده از آزمایش کوانتومتری بدست آمده، و همچنین خواص مکانیکی آلیاژها در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

و افزایش نرخ کارسختی می‌گردد [۲]. از میان روش‌های مختلف اتصال تیتانیوم و آلومینیوم، جوشکاری قابلیت و کاربرد بیشتری دارد. جوشکاری به روش همزن اصطکاکی روشی جدید برای اتصال فلزات در حال جامد می‌باشد که در سال ۱۹۹۱ توسط پژوهشکده جوش انگلستان اختراع شد [۳]. در این روش ابزاری با سرعت چرخش معین وارد لبه‌های محل اتصال دو فلز می‌شود و با سرعتی ثابت در طول خط اتصال پیش می‌رود، که نتیجه آن ایجاد حرارت، تغییر فرم پلاستیکی شدید و جابجایی ماده در محل اتصال بوده و منجر به اتصال کامل لبه‌ها می‌گردد [۴]. این روش در حال حاضر برای اتصال آلیاژهای استحکام بالا در صنایع مختلف از جمله صنایع دریایی و هوافضا مورد استفاده گسترده قرار می‌گیرد [۵]. در این روش میزان حرارت ورودی از سایر روش‌ها کمتر بوده و همین مطلب منجر به حداقل تغییرات ساختاری و حاصل شدن خواص مکانیکی بهتر در مقایسه با سایر روش‌های جوشکاری می‌گردد [۶-۷]. همچنین گاهی این روش به سایر روش‌های موجود در زمینه ساخت انواع سازه‌ها ترجیح داده می‌شود، به عنوان مثال مشاهده شده است که برای ساخت کشتی، جوشکاری آلومینیوم با این روش نسبت به کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف، از لحاظ مصرف سوخت کمتر، سرعت بالاتر، ظرفیت بیشتر و مقاومت بیشتر در برابر خوردگی مناسب‌تر می‌باشد [۸]. خوردگی آلیاژهای جوشکاری شده به این روش معمولاً با استفاده از روش‌هایی از قبیل آزمون‌های غوطه‌وری، تکنیک‌های پلاریزاسیون و طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی مورد بررسی

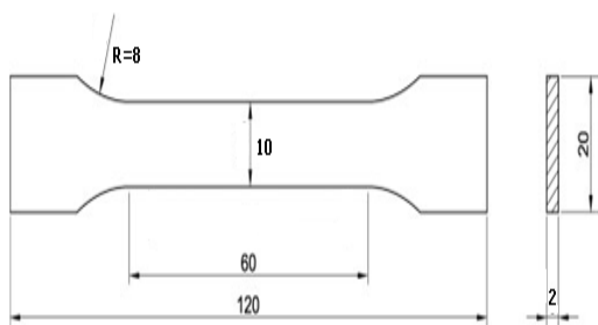
جدول (۱): ترکیب شیمیایی فلزات پایه مورد استفاده در تحقیق (بر حسب درصد وزنی)

Zn	V	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Nb	Sn	Zr	Si	Mg	Al	Ti	فلز پایه
-	<۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	<۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۱	-	۰/۰۱	-	تیتانیوم خالص تجاری
۰/۰۱۰۴	۰/۰۱۲۰	۰/۰۶۰۵	۰/۰۵۰۳	۰/۲۹۲	۰/۴۲۸	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۱	-	۰/۱۱۷	۴/۱۹	پایه	-	آلومینیوم H321-5083

جدول (۲): خواص مکانیکی فلزات پایه مورد استفاده در تحقیق

فلز پایه	سختی (ویکرز)	ازدیاد طول (%)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)
تیتانیوم خالص تجاری	۳۰۰	۳۹	۳۲۶	۴۰۱/۶
آلیاژ آلومینیوم 5083-H321	۸۰	۱۴/۳	۲۵۳	۳۴۸

مکانیکی اتصال، آزمون کشش سرد مطابق با استاندارد E8M ASTM توسط دستگاه کشش مدل Instron 4486 ساخت کشور انگلستان و آزمون سختی سنجی در فواصل ۱ میلی‌متر از خط مرکزی جوش، با بار اعمالی ۱۰ kg و به مدت ۱۰s، توسط دستگاه ریز سختی سنجی مدل Koopa MH1 ساخت کشور ایران انجام شد. در شکل ۱ شماتیکی از ابعاد نمونه استفاده شده در آزمون کشش آمده است.



شکل (۱): شماتیک ابعاد نمونه‌های مورد استفاده در آزمون کشش (اندازه‌ها بر حسب میلی‌متر)

جهت انجام جوشکاری همزن اصطکاکی در این تحقیق از دستگاه فرز مدل 6T10 ساخت کشور روسیه استفاده شده است. همچنین برای شناسایی ترکیبات بین فلزی و فازهای ایجاد شده، پس از انجام فرآیند جوشکاری، از آنالیز پراش پرتو ایکس استفاده شد. آنالیز پراش پرتو ایکس با استفاده از دستگاه فیلیپس مدل Xpert MPD انجام شده است.

## ۲-۲- بررسی رفتار خوردگی

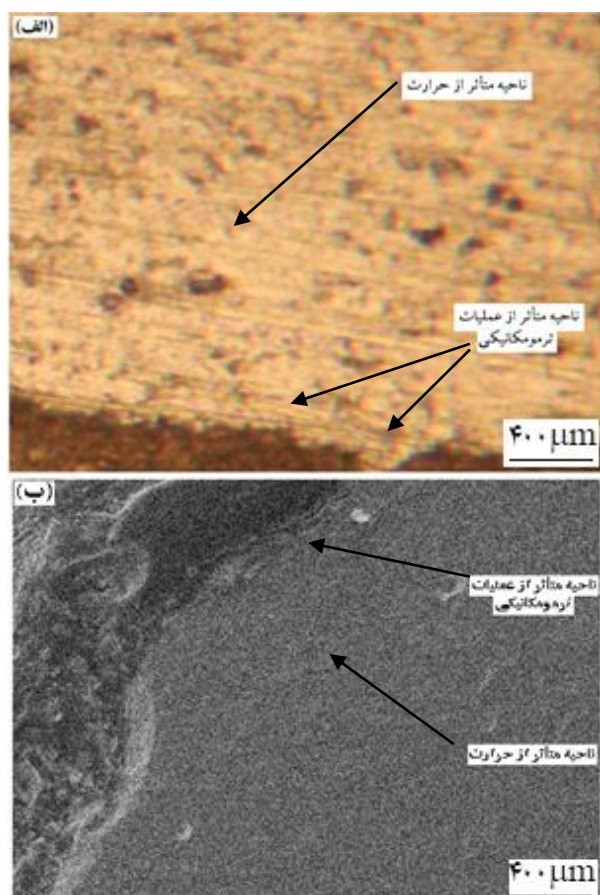
جهت بررسی رفتار خوردگی ابتدا با استفاده از دستگاه وایرکات از فلز پایه آلومینیوم و تیتانیوم، نواحی متأثر از حرارت تیتانیوم و

نمونه‌های جوشکاری در ابعاد ۱۰×۵ سانتی‌متر و در وضعیت لب به لب، و در شرایطی که تیتانیوم در سمت پیش‌ران و آلومینیوم در سمت پس‌ران بود، به یکدیگر جوش داده شدند. نمونه‌ها جهت آزمون کشش در ابعاد ۱۰۰×۶۰ میلی‌متر و جهت بررسی ریزساختار و ریزسختی در ابعاد ۱۰۰×۲۵ میلی‌متر تهیه شدند. بین مورد استفاده از جنس کاربید تنگستن بوده و با اعمال زاویه ۳ درجه نسبت به سطح جوش، عملیات جوشکاری صورت پذیرفت. جوشکاری تحت محافظت گاز آرگون با دبی ۳ lit/min انجام شد. پارامترهای استفاده شده برای انجام جوشکاری در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول (۳): تقسیم‌بندی نمونه‌ها بر اساس پارامترهای در نظر گرفته شده جهت جوشکاری تیتانیوم خالص تجاری و آلیاژ آلومینیوم 5083-H321

شماره نمونه	سرعت چرخش ابزار (rpm)	سرعت پیشروی ابزار (mm/min)
۱	۸۰۰	۵۰
۲	۱۰۰۰	۵۰
۳	۱۱۲۰	۵۰

نمونه‌های متالوگرافی جهت سمباده‌زنی و پولیش، مانت گرم شدند و سپس توسط سمباده‌های ۶۰ تا ۲۵۰۰ عملیات سمباده‌زنی انجام شد. نمونه‌های پولیش شده مطابق با استاندارد ASTM E407 در محلول کرول با ترکیب ۲ درصد حجمی اسید فلئوئوریدریک، ۴ درصد حجمی اسید نیتریک و ۹۴ درصد حجمی آب به مدت ۴۰ ثانیه اچ شدند، سپس توسط میکروسکوپ نوری مدل Nikon مورد مطالعه قرار گرفتند. در ادامه جهت بررسی دقیق‌تر ریزساختار از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل LEO 435 VP استفاده شد. به منظور بررسی خواص



شکل (۲): تصاویر بدست آمده از ناحیه متأثر از حرارت آلومینیوم ۵.۸۳؛ (الف): میکروسکوپ نوری (۴۰۰ μm) و (ب): میکروسکوپ الکترونی روبشی

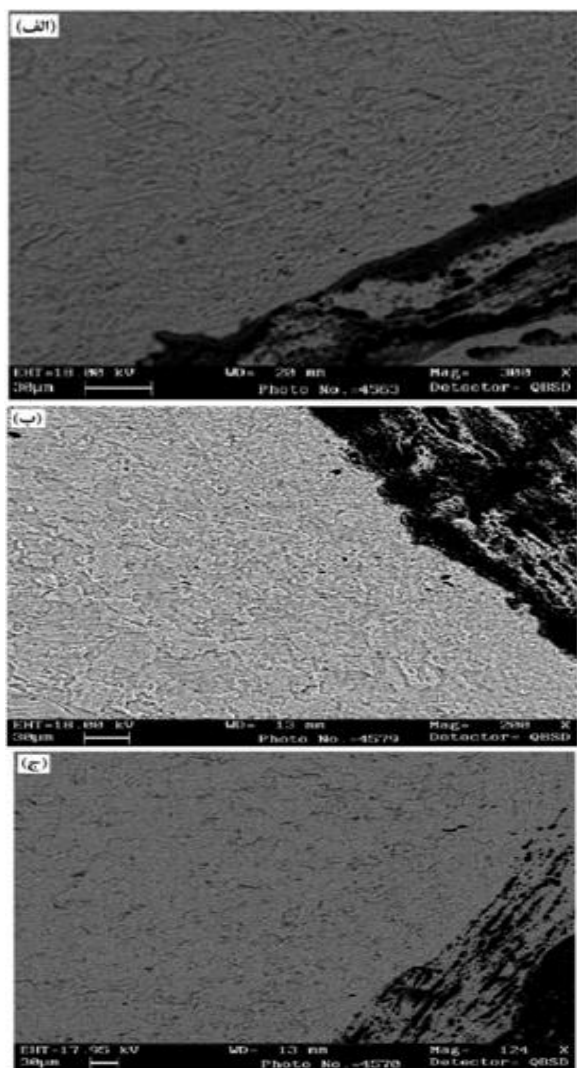
طبق شکل ریزساختار شامل ناحیه هم‌زده، ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی، ناحیه متأثر از حرارت و فلز پایه است. ناحیه متأثر از حرارت تحت تأثیر سیکل حرارتی قرار می‌گیرد ولی متحمل تغییر فرم پلاستیکی نمی‌گردد، در این منطقه ساختار دانه‌ها مشابه فلز پایه است. ریزساختار مربوط به ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی شامل دانه‌های تغییر شکل یافته و کشیده شده به سمت بالا در کنار ناحیه هم‌زده می‌باشد. 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 ناحیه هم‌زده به سمت بالا تغییر شکل پیدا کرده‌اند. همانگونه که مشخص است، ناحیه هم‌زده و ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی دارای مرز بارز بوده و تغییرات ریزساختاری به

آلومینیوم، ناحیه جوش و سطح مقطع جوش، نمونه‌هایی با ابعاد ۱ سانتی متر مربع بریده شده و برای ایجاد اتصال الکتریکی، سیم مسی روکش دار با استفاده از چسب نقره به پشت نمونه‌ها اتصال داده شد و در ادامه با استفاده از رزین دو فازي مانت سرد شده و عملیات سمپاده‌زنی تا شماره ۱۰۰۰ بر روی آنها انجام شد. برای انجام آزمایش‌های خوردگی از دستگاه پتانسیواستات AMETEK مدل parstat 2273 استفاده شده است. در طول انجام آزمایش ظرفی که نمونه‌ها در آن قرار داشتند روباز بوده و آزمایش‌ها در دمای محیط انجام شدند. به منظور انجام آزمون پلاریزاسیون نافل پتانسیل در بازه  $-0.25$  ولت تا  $+0.5$  ولت اعمال شد. همچنین سیستم سه الکترودی شامل الکترود مرجع کالومل اشباع (SCE)، الکترود پلاتینی به عنوان الکترود شمارنده و نمونه به عنوان الکترود کار، بکار گرفته شد. نرخ اسکن  $1 \text{ mV/s}$  انتخاب شده و نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش به مدت ۱۵ دقیقه درون محلول قرار داده شدند تا میان نمونه‌ها و محلول تعادل برقرار گردد. برای تحلیل نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون نافل، نرم‌افزار Corr view مورد استفاده قرار گرفت. بررسی رفتار خوردگی به روش امپدانس الکتروشیمیایی در محدوده فرکانس  $10 \text{ mHz}$  تا  $100 \text{ kHz}$ ، دامنه جریان AC و با اعمال پتانسیل  $10 \text{ mV}$  انجام شد. به منظور تحلیل نتایج و نمودارهای بدست آمده در آزمون امپدانس الکتروشیمیایی از نرم‌افزارهای Power suite و Ivium soft استفاده شد. کلیه آزمایش‌های مربوط به بررسی رفتار خوردگی در این تحقیق درون محلول  $3/5$  درصد کلرید سدیم انجام شده است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی‌های ریزساختاری

در شکل ۲ (الف) و (ب)، به ترتیب تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی از طرف آلیاژ آلومینیوم ۵.۸۳، مشاهده می‌شود.

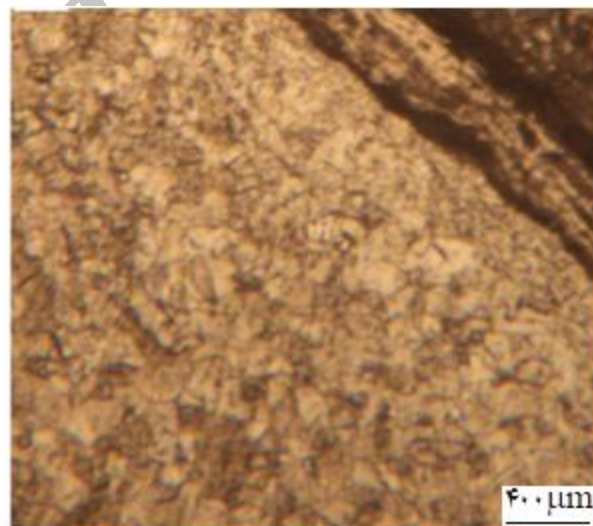


شکل (۴): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی: (الف): نمونه ۱، (ب): نمونه ۲ و (ج): نمونه ۳

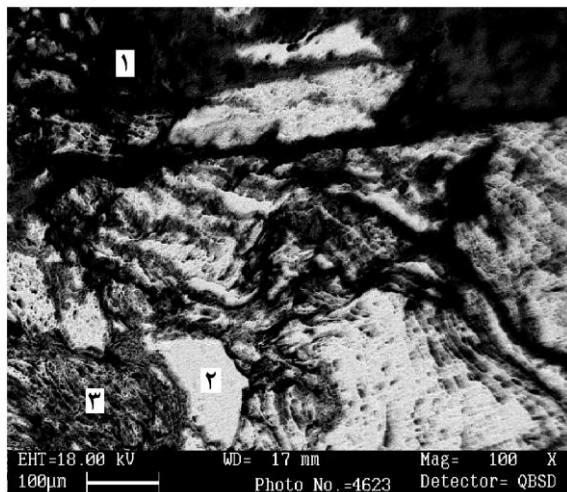
ریزساختار این ناحیه شامل ناحیه هم‌زده، ناحیه متأثر از حرارت و فلز پایه می‌باشد. وجود یک مرز تند بین ناحیه هم‌زده و ناحیه متأثر از حرارت نشان دهنده عدم وجود ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی می‌باشد. برخلاف آلیاژ آلومینیوم، فلز تیتانیوم جوشکاری شده به روش همزن اصطکاکی فاقد منطقه متأثر از عملیات ترمومکانیکی می‌باشد [۲۵-۲۷]. آلیاژهای تیتانیوم دارای استحکام بالا و قابلیت هدایت حرارتی پایین‌تری نسبت به آلیاژهای آلومینیوم می‌باشند، به همین علت حرارت تولید شده در فرآیند جوشکاری فاصله زیادی از منطقه جوش نمی‌گیرد،

طور ناگهانی اتفاق می‌افتد. ریزساختار ناحیه هم‌زده شامل دانه‌های ریز هم محور و تبلور مجدد یافته می‌باشد. وجود دانه‌های هم محور و تبلور مجدد یافته در ناحیه هم‌زده، مشخصه بارز فرآیند همزن اصطکاکی است. دلیل تشکیل این دانه‌ها تغییر شکل پلاستیک شدید ناشی از حرکت دورانی و پیش‌رونده ابزار و به دنبال آن وقوع پدیده تبلور مجدد دینامیکی گزارش شده است [۲۳-۲۴].

شکل ۳ تصویر میکروسکوپ نوری ناحیه متأثر از حرارت تیتانیوم را برای نمونه ۳ (بدلیل تشابه تصاویر میکروسکوپ نوری از ارائه تصویر سایر نمونه‌ها صرف نظر شده است) و شکل ۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی، ناحیه متأثر از حرارت تیتانیوم، در نمونه‌های ۱ تا ۳ را نشان می‌دهد.



شکل (۳): تصویر میکروسکوپ نوری ناحیه متأثر از حرارت تیتانیوم در نمونه شماره ۳ (۴۰۰ μm)

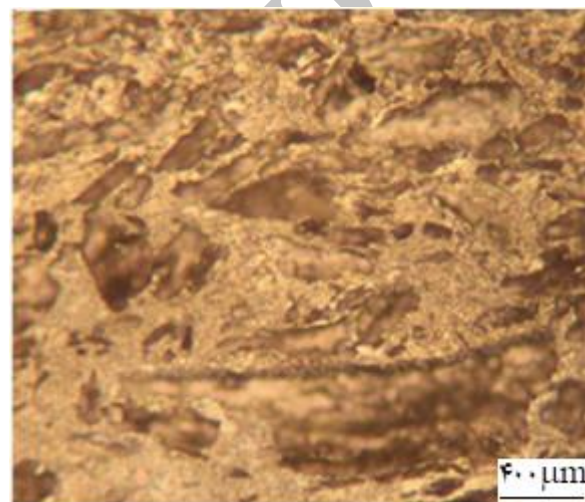


شکل (۶): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با الکترون برگشتی نمونه شماره ۲

همان طور که در ناحیه 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. مورفولوژی ناحیه ۱ یک ساختار سیاه رنگ دارد که نوع و میزان عناصر موجود در آن بسیار نزدیک به فلز آلومینیوم می باشد و این گونه قابل توضیح است که لایه های آلیاژ آلومینیوم توسط نیروی بین وارد فصل مشترک شده اند. عنصر اصلی در لایه ۲ تیتانیوم است که در آن مقدار کمی آلومینیوم بصورت ذرات پراکنده وجود دارد [۲۸]. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل ۷، نواحی مختلف موجود در تصویر نمونه ۲، در نمونه های ۱ و ۳ نیز دیده می شود.

بنابراین ناحیه سرد و مستحکم تر اطراف ناحیه جوش در مقابل تغییر فرمی که ایجاد کننده منطقه متأثر از عملیات ترمومکانیکی است، مقاومت می کند. لذا در جوشکاری همزن اصطکاکی آلیاژ تیتانیوم از ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی صرف نظر می - گردد.

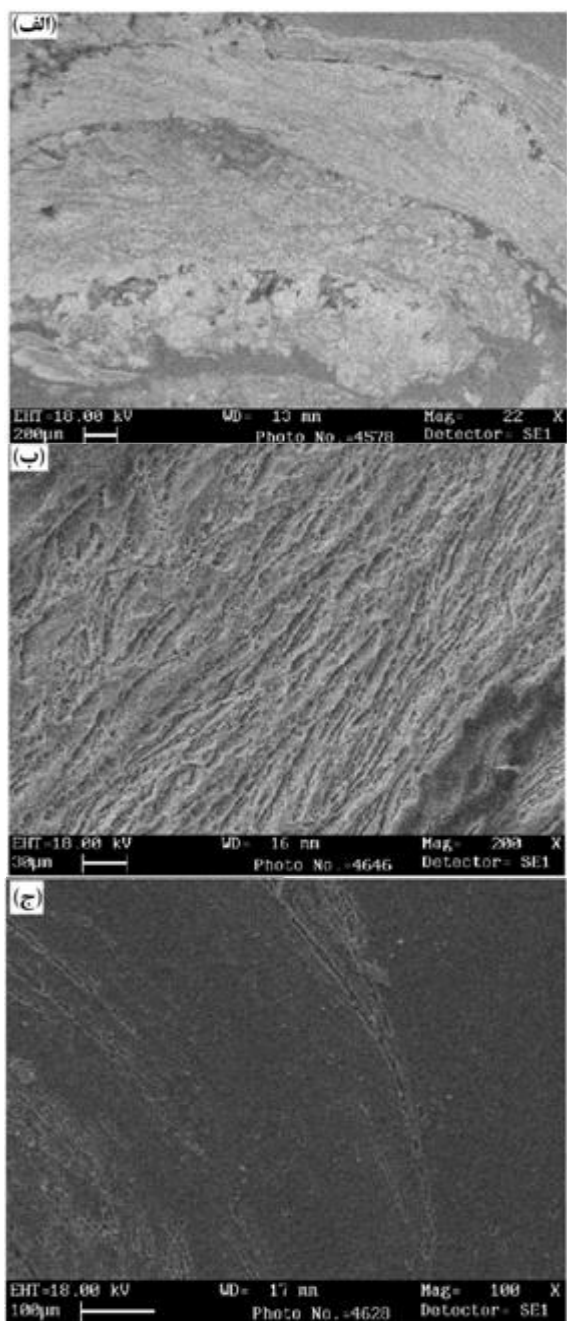
شکل ۵، تصویر میکروسکوپ نوری نمونه شماره ۳ و شکل ۶، تصویر الکترونی روبشی با الکترون برگشتی را برای ناحیه جوش نمونه ۲ نشان می دهد.



شکل (۵): تصویر میکروسکوپ نوری نمونه شماره ۳ (۴۰۰ µm)

همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود، ریز ساختار این ناحیه بصورت مخلوطی از لایه های تیتانیوم و آلومینیوم است که ذرات تیتانیوم دارای اشکال مختلف و همچنین توزیع ناهمگن هستند. ناحیه هم زده بالاترین دما و بیشترین میزان تغییر فرم را در طی فرآیند جوشکاری همزن اصطکاکی تحمل می کند. در این روش جوشکاری، فرآیند تبلور مجدد دینامیکی مکانیزم اصلی برای تغییرات ریزساختاری در ناحیه هم زده است [۲۸].

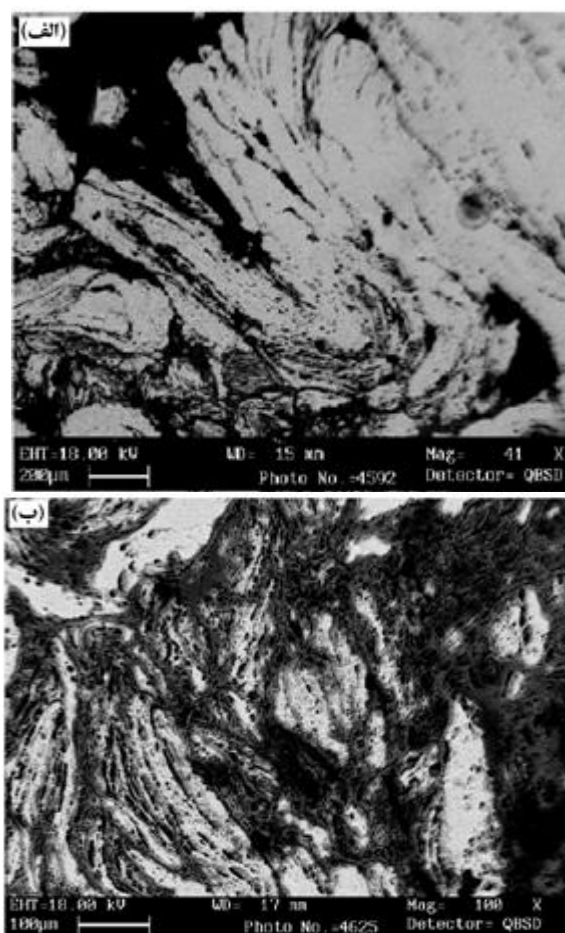
بر اساس شکل ۶ به وضوح مشخص است که منطقه فصل مشترک دارای ۳ ناحیه متفاوت است که با اعداد ۱، ۲ و ۳ مشخص شده اند.



شکل (۸): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با الکترون ثانویه از ناحیه

جوش: (الف): نمونه ۱، (ب): نمونه ۲ و (ج): نمونه ۳

لازم به ذکر است در نمونه‌هایی که با سرعت چرخش بالاتر از ۱۱۲۰ دور بر دقیقه جوشکاری شدند، بدلیل میزان حرارت ورودی بیش از حد اتصال مناسب بدست نیامده و انجام آزمایش‌ها بر روی آن امکان‌پذیر نبوده است. زیرا طبق مطالعات انجام شده افزایش نسبت جوشکاری از یک حد مشخص به بعد،



شکل (۷): تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی با الکترون

برگشتی: (الف): نمونه ۱ و (ب): نمونه ۳

برای نمایش بهتر ریز ساختار ناحیه جوش تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با الکترون ثانویه تهیه شد. همان طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت چرخش ابزار عیوب موجود در ناحیه جوش کاهش می‌یابد. کمترین عیوب در نمونه ۳ و بیشترین ترک و حفره در نمونه ۱ دیده می‌شود.

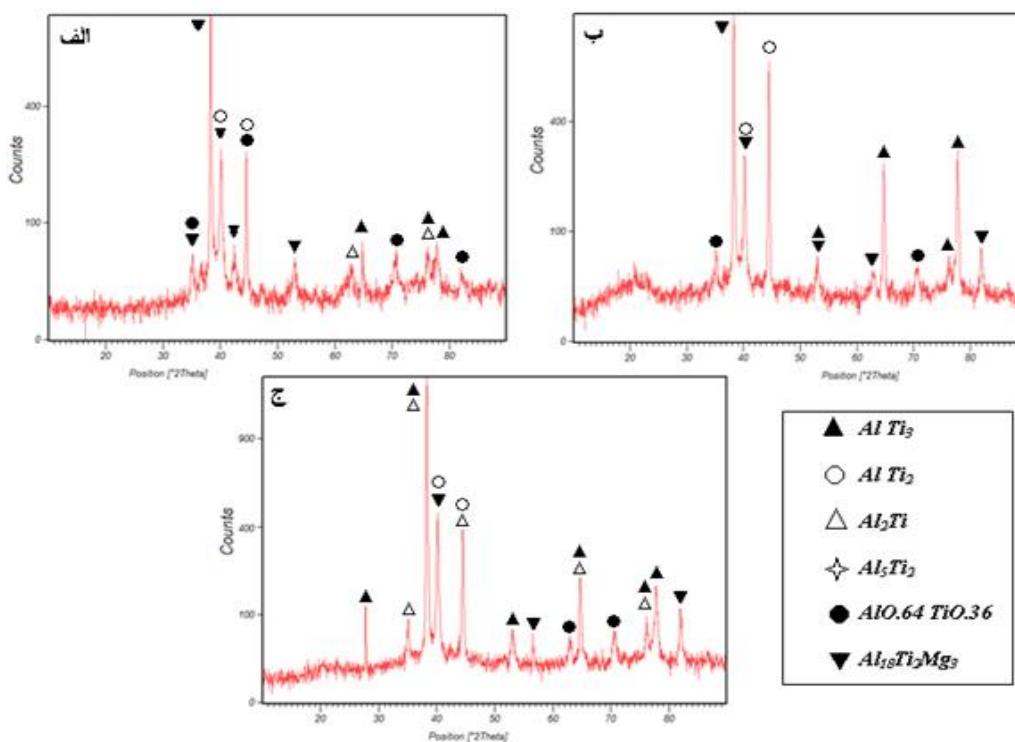
گرمای ورودی به منطقه جوش افزایش پیدا می‌کند. بنابراین یکی از راه‌های کاهش گرمای ورودی در جوشکاری، کاهش نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی می‌باشد [۲۹، ۳۳]. این نسبت برای نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۱۶، ۲۰ و ۲۲/۴ می‌باشد. بنابراین در نمونه ۳ بیشترین و مناسب‌ترین حرارت ورودی باعث شده است که بیشترین ترکیبات بین فلزی در این شرایط حاصل شود. همچنین با توجه به میزان حرارت ورودی، پس از نمونه ۳، به ترتیب در نمونه‌های ۲ و ۱ بیشترین ترکیبات بین فلزی تشکیل شده است. همان‌طور که گفته شد بدلیل اینکه در سرعت‌های چرخش بالاتر از ۱۱۲۰ دور بر دقیقه کیفیت جوش بسیار نامناسب بود از انجام آزمایش‌ها بر روی امکان پذیر نبود. علت این مطلب افزایش بیش از حد حرارت ورودی به ناحیه جوش بوده است که موجب اکسیداسیون منیزیم موجود در آلیاژ آلومینیوم شده و علاوه بر اینکه منجر به اتصال نامناسب می‌گردد، موجب حاصل نشدن مخلوط مناسب میان تیتانیوم و آلومینیوم شده و در نتیجه کاهش ترکیبات بین فلزی در ناحیه مرکزی جوش را خواهیم داشت.

دستیابی به یک جوش مناسب و بدون عیب را سخت و گاهی غیر ممکن می‌کند و در نتیجه مقدار بهینه‌ای برای نسبت جوشکاری بایستی تعیین کرد تا در حالیکه حداقل گرمای ورودی ایجاد شود، اتصالی مناسب از نظر ریزساختاری نیز بدست آید [۲۹].

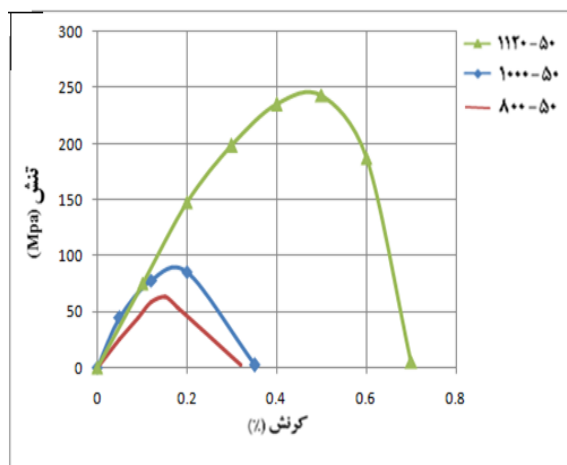
### ۳-۲- آنالیز پراش اشعه ایکس

یکی از پارامترهای اصلی در اتصال مناسب میان آلومینیوم و تیتانیوم، به روش جوشکاری هم‌زن اصطکاکی، تشکیل ترکیبات بین فلزی می‌باشد که به متغیرهای فرآیند و میزان حرارت ورودی وابسته است [۳۰-۳۲]. در شکل ۹، دیاگرام‌های فازي بدست آمده از آنالیز ناحیه جوش در نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ترکیبات بین فلزی بدست آمده از آنالیز ناحیه جوش شامل  $Al_7Ti$ ،  $AlTi_2$ ،  $AlTi_3$  و  $Al_5Ti_2$  می‌باشد. با توجه به دیاگرام‌ها، بیشترین ترکیبات بین فلزی در بالاترین سرعت چرخش ابزار بدست آمده است. و این مطلب بدلیل حرارت ورودی مناسب به ناحیه جوش و اختلاط مناسب تر بین فلزات پایه می‌باشد. به طور کلی با افزایش سرعت چرخش ابزار، نسبت  $\frac{\omega}{v}$  افزایش یافته و در نتیجه





شکل (۹): دیاگرام‌های فازی بدست آمده از ناحیه جوش: (الف): نمونه ۱، (ب): نمونه ۲ و (ج): نمونه ۳



شکل (۱۰): نمودار تنش- کرنش نمونه‌های ۱، ۲ و ۳

طبق شکل ۱۰، هنگامی که سرعت چرخش 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 [۳۴].

### ۳-۳-۲- بررسی نتایج آزمایش سختی

### ۳-۳-۳- بررسی خواص مکانیکی

#### ۳-۳-۳-۱- بررسی نتایج آزمایش کشش

شکل ۱۰، نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت چرخش ابزار استحکام افزایش پیدا کرده است. این مطلب می‌تواند بدلیل وجود ترکیبات بین‌فلزی بیشتر در این شرایط باشد که موجب ایجاد چسبندگی بیشتر در ناحیه جوش شده است [۳۴].

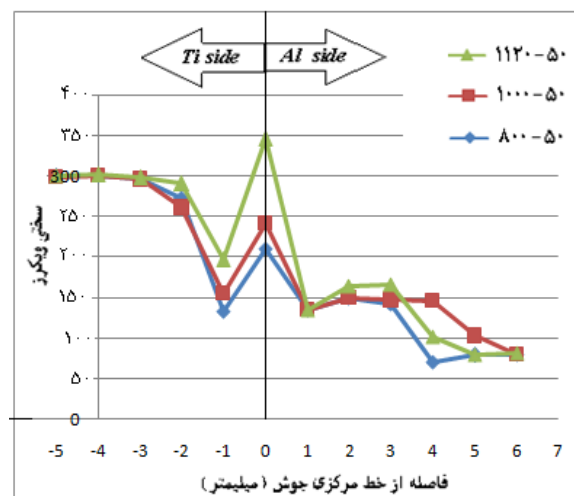
دقیقه سختی بدست آمده در ناحیه هم‌زده از فلز پایه آلومینیوم بیشتر و از فلز پایه تیتانیوم کمتر می‌باشد. در این شرایط میزان حرارت ورودی به ناحیه جوش به اندازه‌ای نبوده است که بتواند موجب ریزتر شدن ساختار شود و همچنین تشکیل ترکیبات بین فلزی به اندازه‌ای نبوده است که سختی در این ناحیه از فلز پایه تیتانیوم بالاتر برود. علت اصلی کاهش سختی در ناحیه متأثر از حرارت، در هر دو قسمت پیش‌رونده و پس‌رونده، رشد دانه‌ها در این نواحی می‌باشد [۳۹]. علت دیگری که موجب کاهش سختی در ناحیه متأثر از حرارت شده است درشت‌تر شدن رسوبات و افزایش ناحیه عاری از رسوب در مجاورت مرز دانه‌ها باشد [۴، ۱۹، ۴۰]. افزایش یا کاهش میزان  $\frac{\omega}{V}$  از مقدار بهینه  $22/4$  باعث کاهش میزان سختی در ناحیه جوش می‌شود. زیرا کاهش نسبت بهینه باعث کاهش درجه حرارت ورودی به جوش و کاهش سختی می‌گردد. بنابراین طبق توضیحات داده شده در رابطه با نتایج خواص مکانیکی و ریز ساختار، می‌توان نسبت بهینه جوشکاری را در این تحقیق  $22/4$  معرفی کرد.

### ۳-۴-۳- بررسی نتایج آزمون پلاریزاسیون تافل

#### ۳-۴-۳-۱- ناحیه متأثر از حرارت آلومینیوم و فلز پایه آن

در شکل ۱۲، نمودار تافل مربوط به ناحیه متأثر از آلومینیوم و فلز پایه آن، مشاهده می‌شود. همچنین جدول ۴، نتایج حاصل از تحلیل منحنی‌های تافل، به کمک نرم‌افزار، آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت چرخش ابزار پتانسیل خوردگی کاهش یافته است زیرا در این شرایط حرارت ورودی به ناحیه متأثر از حرارت افزایش یافته و در نتیجه رسوبات بیشتر و بزرگتری وجود خواهد داشت و این اتفاق منجر به کاهش مقاومت به خوردگی می‌گردد [۴، ۱۶، ۱۸، ۱۹، ۴۰-۴۲]. همچنین در این شرایط نیز مقاومت به خوردگی ناحیه متأثر از حرارت در مقایسه با فلز پایه کاهش یافته است. در جدول ۴، پتانسیل و جریان خوردگی، شیب منحنی‌های کاتدی و آنودی آمده است.

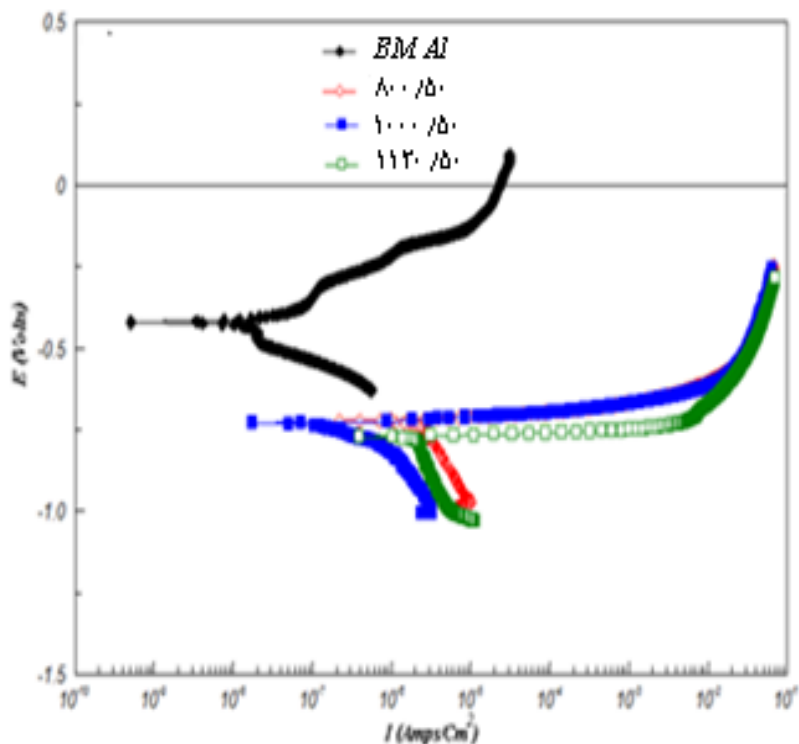
شکل ۱۱، پروفیل سختی با فاصله از مرکز جوش، به سمت فلز پایه از طرف تیتانیوم و آلومینیوم، را برای نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ نشان می‌دهد.



شکل (۱۱): پروفیل سختی ناحیه جوش نمونه‌های ۱، ۲ و ۳

همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه نمونه‌ها، ناحیه هم‌زده دارای سختی بالاتری نسبت به ناحیه متأثر از حرارت می‌باشد و فلز پایه آلومینیوم دارای کمترین سختی است. با افزایش سرعت چرخش ابزار سختی بدست آمده در ناحیه جوش افزایش یافته است [۱۸]. طبق مطالعات صورت گرفته بیشترین میزان سختی ناحیه جوش در نمونه شماره ۳ می‌تواند به دو دلیل باشد، دلیل اول تغییر شکل پلاستیکی بوجود آمده در ناحیه هم‌زده و همچنین ریزتر بودن ساختار به دلیل تبلور مجدد دینامیکی در ناحیه هم‌زده نسبت به فلز پایه می‌باشد، ریزتر شدن ساختار باعث افزایش استحکام می‌گردد، سختی نیز با استحکام ارتباط مستقیم دارد، بنابراین سختی در ناحیه هم‌زده افزایش می‌یابد [۲۷، ۳۵-۳۸].

دلیل دوم افزایش میزان سختی در در ناحیه هم‌زده، مطابق با نتایج پراش اشعه ایکس این است که در این ناحیه مخلوطی از آلومینیوم و تیتانیوم تشکیل می‌شود [۱۵، ۳۴]، که یک ترکیب بین فلزی می‌باشد و باعث افزایش سختی می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سرعت‌های چرخش ۸۰۰ و ۱۰۰۰ دور بر



شکل (۱۲): منحنی‌های تافل ناحیه متأثر از حرارت آلومینیوم نمونه‌های ۱ تا ۳ و فلز پایه آلومینیوم

جدول (۴): نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون تافل برای ناحیه متأثر از حرارت آلومینیوم در نمونه‌های ۱ تا ۳ و فلز پایه آلومینیوم

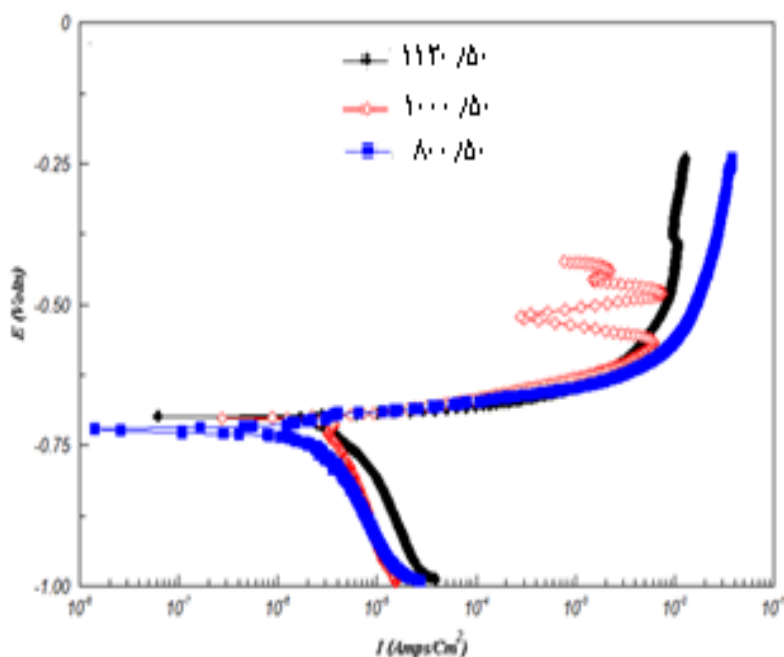
نمونه	$E_{corr}(V)$	$I_{corr}(A/Cm^2)$	$R_p$ (ohm/Cm <sup>2</sup> )	C.R (Mpy)	$-\beta_c$	$\beta_a$
BM	-۰/۴۲۰	$2/8 \times 10^{-8}$	۴۱۲۰۵	۰/۱۲	۱۰۳	۴۳/۳
۱	-۰/۷۲۲	$1/94 \times 10^{-6}$	۷۶۸۶/۹	۱/۲۷۶	۴۴/۴	۱۲/۴
۲	-۰/۷۳۶	$2/08 \times 10^{-6}$	۴۷۶۰	۲/۳۸۴	۱۰۲/۹	۱۴/۴
۳	-۰/۷۸۰	$2/27 \times 10^{-6}$	۴۳۵۴/۹	۲/۶	۱۱۶	۱۲

### ۳-۴-۲- ناحیه متأثر از حرارت تیتانیوم و فلز پایه آن

نتایج بدست آمده در ناحیه متأثر از حرارت تیتانیوم مشابه نتایج این ناحیه در طرف آلومینیوم می‌باشد و از ارائه آنها صرف نظر شده است. مطابق با نتایج بدست آمده، با افزایش سرعت چرخش ابزار، پتانسیل خوردگی کاهش یافته و در نتیجه مقاومت در برابر خوردگی کمتری مشاهده شد، که این مطلب بخاطر تولید و رشد رسوبات در این ناحیه می‌باشد.

### ۳-۴-۳- ناحیه جوش و سطح مقطع جوش

در شکل ۱۳ و جدول ۵، به ترتیب منحنی‌های تافل و نتایج حاصل از تحلیل آنها ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود بیشترین مقاومت در برابر خوردگی در نسبت بهینه حاصل شده است.



شکل (۱۳): منحنی‌های تافل مربوط به ناحیه جوش

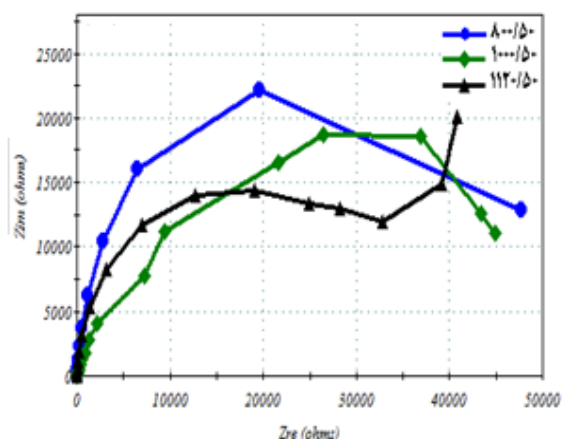
جدول (۵): نتایج منحنی‌های تافل برای ناحیه جوش و فلزات پایه

$\beta_a$	$-\beta_c$	C.R (Mpy)	Rp (ohm/Cm <sup>2</sup> )	I <sub>corr</sub> (A/Cm <sup>2</sup> )	E <sub>corr</sub> (V)	نمونه
۴۳/۳	۱۰۳	۰/۲۷۵	۴۱۲۰۵	$۲/۸ \times 10^{-۸}$	-۰/۴۲۰	BM Al
۴۷/۵	۴۷/۲	۰/۰۳۵	$۲/۴ \times 10^۵$	$۱/۰۹ \times 10^{-۸}$	-۰/۲۴۵	BM Ti
۱۷/۶	۴۱/۱	۱/۱۵	۸۵۲۴/۸	$۱/۱۵ \times 10^{-۶}$	-۰/۷۱۸	۱
۱۶/۶	۲۸/۷	۱/۱۹	۹۵۳۳	$۴/۳۹ \times 10^{-۷}$	-۰/۷۰۵۱	۲
۱۴/۱	۸۶	۰/۸۷۷	۱۱۱۹۰	$۱/۹۷ \times 10^{-۷}$	-۰/۷۰۳۳	۳

شده در سرعت پیشروی ثابت، با افزایش سرعت چرخش ابزار مقاومت در برابر خوردگی، در ناحیه جوش، افزایش می‌یابد. نتایج بدست آمده در سطح مقطع جوش نیز مشابه ناحیه جوش بوده است، به گونه‌ای که با افزایش سرعت چرخش ابزار پتانسیل خوردگی افزایش یافته و در نتیجه مقاومت در برابر خوردگی نیز افزایش یافته است. بدلیل تشابه میان نتایج سطح مقطع جوش با ناحیه مرکزی جوش از ارائه نتایج مربوط به سطح مقطع جوش صرف نظر شده است.

### ۳-۵- بررسی نتایج آزمون طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی

این مطلب با توجه به نتایج بدست آمده از آنالیز پراش پرتو ایکس و میزان حرارت ورودی قابل بررسی می‌باشد [۴، ۱۶، ۱۸، ۱۹، ۴۰-۴۲]. اول اینکه هرچه میزان حرارت ورودی به ناحیه جوش بالاتر باشد دانه‌های حاصل از تبلور مجدد در دمای بالاتر درشت‌تر بوده و میزان بالاتری از رسوبات حل شده- اند و در نتیجه مقاومت در برابر خوردگی بالاتر خواهد بود، علت دوم را می‌توان در ترکیبات بین فلزی جستجو کرد، به این ترتیب که گرمای ورودی مناسب‌تر و به دنبال آن اختلاط بهتر میان تیتانیوم و آلومینیوم شده و در نتیجه موجب ایجاد ترکیبات بین فلزی مقاوم در برابر خوردگی شده است. مطابق نتایج ارائه



شکل (۱۴): منحنی نایکوئیست بدست آمده از آزمون امپدانس

الکتروشیمیایی برای ناحیه متأثر از حرارت آلومینیوم نمونه‌های ۱ تا ۳

نتایج حاصل از تحلیل نمودارهای نایکوئیست، با استفاده از نرم-افزار، در جدول ۵ آمده است. در نمودار نایکوئیست نیم دایره کامل نداریم و در ابتدا شبه نیم دایره مشاهده می‌شود، بنابراین خازن لایه دوگانه بصورت کامل نخواهد بود و پارامتر  $Q$  تعریف می‌شود [۴۳-۴۵].

جدول (۵): نتایج نمودار نایکوئیست ناحیه متأثر از حرارت آلومینیوم نمونه‌های ۱ تا ۳

n	W	Q	$R_{ct}$ or $R_p$ (ohm)	$R_s$ (ohm)	نمونه و شرایط جوشکاری
$9 / 939 \times 10^{-1}$	$7 / 593 \times 10^{+3}$	$5 / 81 \times 10^{-6}$	$5 / 414 \times 10^{+4}$	۱۰/۸	نمونه ۱ (۸۰۰/۵۰)
$8 / 301 \times 10^{-1}$	$5 / 699 \times 10^{+3}$	$9 / 396 \times 10^{-6}$	$4 / 409 \times 10^{+4}$	۱۳/۵۶	نمونه ۲ (۱۰۰۰/۵۰)
$7 / 2301 \times 10^{-1}$	$1 / 126 \times 10^{+3}$	$9 / 846 \times 10^{-6}$	$1 / 12 \times 10^{+4}$	۱۰/۶۷	نمونه ۳ (۱۱۲۰/۵۰)

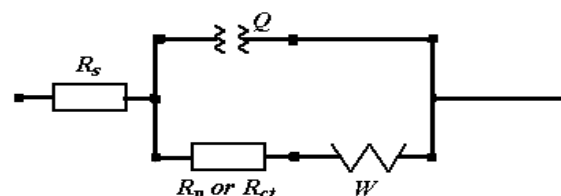
در این مدار معادل  $R_s$  مقاومت محلول،  $R_{ct}$  مقاومت انتقال بار،  $W$  امپدانس واربروگ،  $Q$  رفتار خازنی غیرایده آل (ثابت فازی) و  $n$  عدد ثابت می‌باشد [۴۳-۴۶]. طبق مطالعات صورت گرفته مهمترین پارامتر در تحلیل نتایج حاصل از نمودار نایکوئیست مقدار مقاومت پلاریزاسیون (مقاومت انتقال بار) می‌باشد [۴۷]. با افزایش سرعت چرخش ابزار میزان مقاومت پلاریزاسیون کاهش یافته و در نتیجه مقاومت در برابر خوردگی منطقه متأثر از حرارت آلومینیوم نیز کاهش یافته است، بطوری که بیشترین مقاومت در برابر خوردگی در ناحیه متأثر از حرارت

اطلاعات بدست آمده از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی با نتایج آزمون پلاریزاسیون تافل انطباق دارد. دلایل ذکر شده در تحلیل نتایج آزمون پلاریزاسیون تافل در اینجا نیز صادق می‌باشد و تنها به بررسی نمودارها و مقایسه نمونه‌ها از جنبه مقاومت در برابر خوردگی پرداخته خواهد شد.

### ۳-۵-۱- ناحیه متأثر از حرارت آلومینیوم

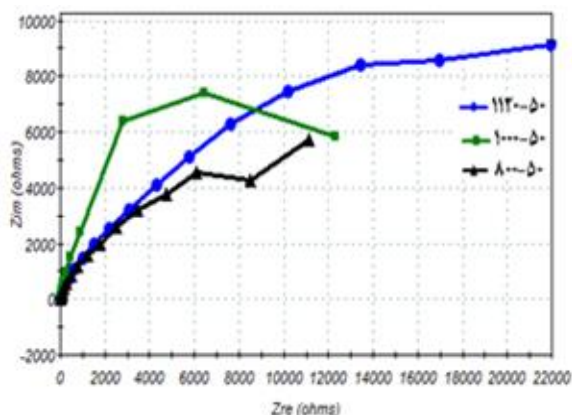
در شکل ۱۴، منحنی نایکوئیست بدست آمده از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی برای ناحیه متأثر از حرارت آلومینیوم مشاهده می‌شود.

با توجه به مطالعات صورت گرفته [۴۳-۴۵]، مدار معادل استفاده شده در تحلیل منحنی‌های نایکوئیست بدست آمده در تمامی نمونه‌ها در شکل ۱۵ ارائه شده است.

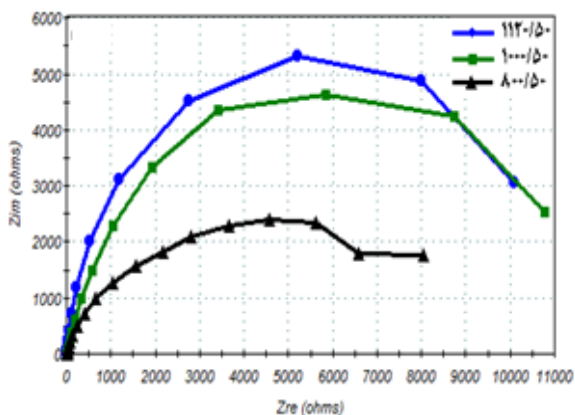


شکل (۱۵): شماتیک مدار معادل مورد استفاده در تحلیل نتایج حاصل از منحنی‌های نایکوئیست

در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ منحنی‌های نایکوئیست مربوط به ناحیه جوش و مقطع جوش نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ مشاهده می‌شود.



شکل (۱۶): منحنی‌های نایکوئیست مربوط به ناحیه جوش نمونه‌های ۱ تا ۳



شکل (۱۷): منحنی‌های نایکوئیست مربوط به ناحیه مقطع جوش نمونه‌های ۱، ۲ و ۳

همچنین در جداول ۷ و ۸ نتایج حاصل از تحلیل منحنی‌های این نواحی آمده است.

آلومینیوم در نمونه شماره ۱ و بدترین خواص خوردگی در ناحیه مشابه مربوط به نمونه شماره ۳ می‌باشد [۱۳، ۴۶، ۴۷]. در اینجا به بررسی مقدار  $n$  و ارتباط آن رفتار خازنی نمودارهای امپدانس پرداخته می‌شود، همان طور که مشاهده می‌گردد مقدار  $n$  همواره در بازه عددی صفر تا ۱ بدست می‌آید، زمانی که مقدار  $n$  برابر با یک شود می‌توان  $Q$  را به عنوان خازن لایه دوگانه در نظر گرفت، یعنی سیستم رفتار خازنی از خود نشان می‌دهد، و هرگاه مقدار  $n$  در بازه صفر تا یک باشد، هرچه مقدار ثابت  $n$  از ۱ کوچکتر باشد میزان له شدگی نمودار بیشتر بوده و سیستم از رفتار خازنی فاصله می‌گیرد. همان طور که در جدول ۶ و شکل ۱۴ مشاهده می‌شود در نمونه شماره ۱ نزدیکترین مقدار ثابت  $n$  را به عدد یک داریم، بنابراین در این نمونه، سیستم بیشترین رفتار خازنی را از خود نشان می‌دهد و بعد از آن بترتیب در نمونه‌های ۲ و ۳ کمترین میزان له شدگی نمودار نایکوئیست و در نتیجه بیشترین رفتار خازنی مشاهده می‌گردد [۴۳-۴۵].

### ۳-۵-۲- ناحیه متأثر از حرارت تیتانیوم

نتایج بدست آمده در ناحیه متأثر از حرارت تیتانیوم مشابه نتایج این ناحیه در طرف آلومینیوم می‌باشد و از ارائه آنها صرف نظر شده است. مطابق با نتایج بدست آمده، با افزایش سرعت چرخش ابزار مقاومت انتقال بار کاهش یافته و در نتیجه مقاومت در برابر خوردگی نیز کاهش می‌یابد که این مطلب بخاطر تولید و رشد رسوبات در این ناحیه می‌باشد.

### ۳-۵-۳- ناحیه جوش و سطح مقطع جوش

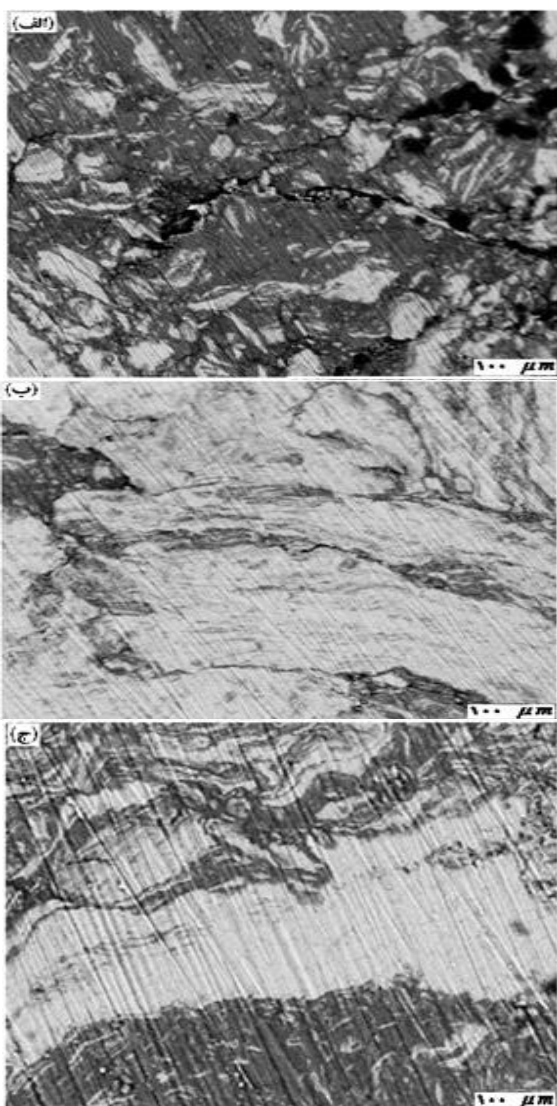
جدول (۶): نتایج حاصل از منحنی نایکوئیست مربوط به ناحیه جوش نمونه‌های ۱ تا ۳

n	W	Q	R <sub>ct</sub> or R <sub>p</sub> (ohm)	R <sub>s</sub> (ohm)	نمونه و شرایط جوشکاری
۸ / ۶۳۸ × ۱۰ <sup>-۱</sup>	۳ / ۱ × ۱۰ <sup>+۲</sup>	۱ / ۷۹۵ × ۱۰ <sup>-۶</sup>	۱ / ۰۷۴ × ۱۰ <sup>+۴</sup>	۱۳/۲	نمونه ۱ (۸۰۰/۵۰)
۸ / ۷۸۲ × ۱۰ <sup>-۱</sup>	۳ / ۸ × ۱۰ <sup>+۲</sup>	۱ / ۶۶۵ × ۱۰ <sup>-۶</sup>	۳ / ۲ × ۱۰ <sup>+۴</sup>	۱۲/۹۹	نمونه ۲ (۱۰۰۰/۵۰)
۹ / ۵۴ × ۱۰ <sup>-۱</sup>	۴ / ۰۶۶ × ۱۰ <sup>+۳</sup>	۸ / ۵۶۲ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۵ / ۰۹۷ × ۱۰ <sup>+۴</sup>	۱۰/۴۸	نمونه ۳ (۱۱۲۰/۵۰)

جدول (۷): نتایج حاصل از منحنی نایکوئیست مربوط به ناحیه مقطع جوش نمونه‌های ۱ تا ۳

n	W	Q	R <sub>ct</sub> or R <sub>p</sub> (ohm)	R <sub>s</sub> (ohm)	نمونه و شرایط جوشکاری
$۸/۰۴ \times ۱۰^{-۱}$	$۱/۴۰۲ \times ۱۰^{+۳}$	$۵/۸۱ \times ۱۰^{-۶}$	$۸/۲۴۱ \times ۱۰^{+۳}$	۱۲/۲۱	نمونه ۱ (۸۰۰/۵۰)
$۸/۹۱۷ \times ۱۰^{-۱}$	$۲/۱۶۵ \times ۱۰^{+۳}$	$۲/۲۹۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۳۱۰ \times ۱۰^{+۴}$	۱۰/۳۶	نمونه ۲ (۱۰۰۰/۵۰)
$۸/۹۵ \times ۱۰^{-۱}$	$۴/۴۶۵ \times ۱۰^{+۳}$	$۸/۲۱ \times ۱۰^{-۷}$	$۳/۹۹۲ \times ۱۰^{+۴}$	۹/۸۳	نمونه ۳ (۱۱۲۰/۵۰)

شماره ۳ می‌باشد که کمترین تعداد حفره و خوردگی بین دانه‌های را نشان می‌دهد. پس از نمونه ۳ به ترتیب نمونه‌های ۲ و ۱ بهترین ریز ساختار را، پس از آزمایش‌های خوردگی، نشان می‌دهند.



شکل (۱۸): تصاویر میکروسکوپ الکترونی ریشی ناحیه جوش پس از

آزمون خوردگی: (الف): نمونه ۱، (ب): نمونه ۲ و (ج): نمونه ۳

همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت چرخش ابزار مقاومت پلازماسیون افزایش پیدا کرده و شاهد افزایش مقاومت در برابر خوردگی می‌باشیم [۱۵]. مناسب‌ترین رفتار خوردگی در نمونه شماره ۳ دیده می‌شود که دلیل این مطلب را می‌توان میزان حرارت ورودی مناسب به ناحیه جوش، میزان حل شدن رسوبات و میزان اختلاط مناسب تر آلومینیوم و تیتانیوم عنوان کرد [۴، ۱۳، ۱۶، ۱۸، ۱۹، ۴۰-۴۲].

مطابق با آنچه پیش از این گفته شد و طبق نمودارهای ۱۶ و ۱۷، با نزدیک شدن مقدار n به عدد ۱، رفتار خازنی سیستم بیشتر شده است.

### ۳-۶- بررسی ریزساختار ناحیه جوش پس از وقوع خوردگی در محلول ۳/۵ درصد کلرید سدیم

در شکل ۱۸، تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، پس از انجام آزمون‌های خوردگی درون محلول ۳/۵ درصد کلرید سدیم، مشاهده می‌شود. همان طور که ملاحظه می‌گردد، پس از انجام آزمایش‌های خوردگی درون محلول، خوردگی موضعی در نواحی جوش مشاهده می‌شود. بر اساس مطالعات انجام شده ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم اثر قابل توجهی بر رفتار خوردگی محل اتصال دو فلز دارد [۱۵، ۱۶، ۴۸]. با توجه به اینکه طبق نتایج پراش اشعه ایکس در ناحیه جوش ترکیبات بین فلزی شامل منیزیم دیده می‌شود وجود این ترکیبات تأثیر منفی بر روی مقاومت در برابر خوردگی خواهند داشت [۴۸، ۱۸]. همان طور که مشاهده می‌شود در تمامی موارد خوردگی حفره‌ای و بین دانه‌ای بوجود آمده است. بهترین نمونه از نظر ریزساختار پس از آزمون خوردگی درون محلول، نمونه

potential of friction stir welded 5083-O Al alloy for leisure ship”, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 19, pp. 898-903, 2009.

- [9] J. Lumsden, M. Mahoney, G. Pollock & C. Rhodes, “Intergranular corrosion following friction stir welding of aluminum alloy 7075-T651. Corrosion”, Corrosion, Vol. 55, pp. 1127-1135, 1999.
- [10] G. Biallas, R. Braun, C. Donne & W. Kaysser, “Mechanical properties and corrosion behavior of friction stir welded 2024-T3”, in 1st International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA, pp. 14-16, 1999.
- [11] F. Hannour, A. Davenport & M. Strangwood, “The 2nd International Symposium on Friction Stir Welding”, Gothenburg, Sweden, 2000.
- [12] J. Lumsden, M. Mahoney, & G. Pollock, “Corrosion behavior of friction stir welded high strength aluminum alloys”, DTIC Document, 2002.
- [13] G. Elatharasan & V. S. S. Kumar, “Corrosion Analysis of Friction Stir-welded AA 7075 Aluminium Alloy”, Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering, Vol. 60, pp. 29-34, 2014.
- [14] K. T. Babu, P. K. Kumar & S. Muthukumaran, “Mechanical, Metallurgical Characteristics and Corrosion Properties of Friction Stir Welded AA6061-T6 Using Commercial Pure Aluminium as a Filler Plate”, Procedia Materials Science, Vol. 6, pp. 648-655, 2014.
- [15] E. T. Akinlabi, A. Andrews & S. A. Akinlabi, “Effects of processing parameters on corrosion properties of dissimilar friction stir welds of aluminium and copper”, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 24, pp. 1323-1330, 2014.
- [16] C. Paglia & R. Buchheit, “A look in the corrosion of aluminum alloy friction stir welds”, Scripta Materialia, Vol. 58, pp. 383-387, 2008.
- [17] C. Rhodes, M. Mohoney, W. Bingel & R. Spurling, “Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum”, Scripta materialia, Vol. 36, pp. 69-75, 1997.
- [18] M. Jariyaboon, A. Davenport, R. Ambat, B. Connolly & D. Price, “The effect of welding parameters on the corrosion behaviour of friction

#### ۴- نتیجه گیری

جوشکاری همزن اصطکاکی، روشی مناسب برای اتصال تیتانیوم خالص تجاری و آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ می باشد. خواص مکانیکی اتصال متأثر از سرعت چرخش ابزار بوده و در نمونه شماره ۳، با بیشترین ترکیبات بین فلزی، بهترین استحکام کششی و سختی مشاهده شده است.

در میان نواحی مورد بررسی، فلزات پایه و سطح مقطع جوش به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقاومت در برابر خوردگی بوده اند. همچنین در ناحیه جوش و ناحیه متأثر از حرارت، با افزایش سرعت چرخش ابزار، مقاومت در برابر خوردگی به ترتیب افزایش و کاهش می یابد.

#### ۵- مراجع

- [1] P.J. Blau, “Friction science and technology: from concepts to applications”, CRC press, 2008.
- [2] Z. Feng, M. L. Santella, S. A. David, R. J. Steel & S. M. Packer, “Friction stir spot welding of advanced high-strength steels-A feasibility study”, SAE Technical Paper, 2005.
- [3] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, E. R. Watts & M. G. Murch, “Method of operating on a workpiece”, Google Patents, 1995.
- [4] R. S. Mishra & Z. Ma, “Friction stir welding and processing”, Materials Science and Engineering, Vol. 50, pp. 1-78, 2005.
- [5] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, E. R. Watts & M. G. Murch, “Friction based welding technology for aluminium”, in Materials Science Forum. Vol. 396, pp. 1543-1548, 2002.
- [6] M. Ericsson & R. Sandström, “Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG”, International Journal of Fatigue, Vol. 25, pp. 1379-1387, 2003.
- [7] M. Ellis, & M. Strangwood, “Welding of rapidly solidified Alloy 8009 (Al-8 5Fe-1 7Si-1 3V): preliminary study”, Materials science and technology, Vol. 12, pp. 970-977, 1996.
- [8] S. H. Park, J. S. Kim, M. S. Han & S. J. Kim, “Corrosion and optimum corrosion protection



- [28] V. Soundararajan, S. Zekovic & R. Kovacevic, "Thermo-mechanical model with adaptive boundary conditions for friction stir welding of Al 6061", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, pp. 1577-1587, 2005.
- [29] Y. h CHEN, N. Quan & L. m. KE, "Interface characteristic of friction stir welding lap joints of Ti/Al dissimilar alloys", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, pp. 299-304, 2012.
- [30] E. P. O. PROCESOV, "Experimental Comparison Of Resistance Spot Welding And Friction-Stir Spot Welding Processes For The En Aw 5005 Aluminum Alloy", *Materiali in tehnologije*, Vol. 45, pp. 395-399, 2011.
- [31] A. Fuji, K. Ikeuchi, Y. Sato & H. Kokawa, "Interlayer growth at interfaces of Ti/Al-1% Mn, Ti/Al-4-6% Mg and Ti/pure Al friction weld joints by post-weld heat treatment", *Science and Technology of Welding & Joining*, Vol. 9, pp. 507-512, 2004.
- [32] A. Fuji, K. Ameyama & T. North, "Influence of silicon in aluminium on the mechanical properties of titanium/aluminium friction joints", *Journal of materials science*, Vol. 30, pp. 5185-5191, 1995.
- [33] A. Fuji, "In situ observation of interlayer growth during heat treatment of friction weld joint between pure titanium and pure aluminium", *Science and Technology of Welding & Joining*, Vol. 7, pp. 413-416, 2002.
- [34] R. Nandan, T. DebRoy & H. Bhadeshia, "Recent advances in friction-stir welding-process, weldment structure and properties", *Progress in Materials Science*, Vol. 53, pp. 980-1023, 2008.
- [35] U. Dressler, G. Biallas & U. A. Mercado, "Friction stir welding of titanium alloy TiAl6V4 to aluminium alloy AA2024-T3", *Materials Science and Engineering*, Vol. 536, pp. 113-117, 2009.
- [36] H. Fujii, Y. Sun, H. Kato & K. Nakata, "Investigation of welding parameter dependent microstructure and mechanical properties in friction stir welded pure Ti joints", *Materials Science and Engineering*, Vol. 527A, pp. 3386-3391, 2010.
- [37] K. Kitamura, H. Fujii, Y. Iwata, Y. sun & Y. Morisata, "Flexible control of the microstructure and mechanical properties of friction stir welded stir welded AA2024-T351", *Corrosion Science*, Vol. 49, No. 2. pp. 877-909, 2007.
- [19] F. Hannour, A. Davenport & M. Strangwood, "Corrosion of friction stir welds in high strength aluminium alloys", in *2nd International Symposium on Friction Stir Welding*, pp. 26-28, 2000.
- [20] W. Hu & E. I. Meletis, "Corrosion and environment-assisted cracking behavior of friction stir welded Al 2195 and Al 2219 alloys", *Materials science forum*, Vol. 331, pp. 1683-1688, 2000.
- [21] G. Frankel & Z. Xia, "Localized corrosion and stress corrosion cracking resistance of friction stir welded aluminum alloy 5454", *Corrosion*, Vol. 55, pp. 139-150, 1999.
- [22] A. Squillace, A. De Fenzo, G. Giorleo & F. Bellucci, "A comparison between FSW and TIG welding techniques: modifications of microstructure and pitting corrosion resistance in AA 2024-T3 butt joints", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 152, pp. 97-105, 2004.
- [23] A. S. f. Testing, & Material, "ASTM designation E 8-00 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", ASTM, 2000.
- [24] H. J. Liu, & Z. Li, "Microstructural zones and tensile characteristics of friction stir welded joint of TC4 titanium alloy", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 20, pp. 1873-1878, 2010.
- [25] M. Grujicic, G. Arakere, B. Pandurangan, A. Hariharan, & B. Cheeseman, "Computational analysis and experimental validation of the friction-stir welding behaviour of Ti-6Al-4V", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 225, pp. 208-223, 2011.
- [26] Y. Zhang, Y. Sato, H. Kokawa & S. Park, "Stir zone microstructure of commercial purity titanium friction stir welded using pcBN tool", *Materials Science and Engineering*, Vol. 448, pp. 25-30, 2008.
- [27] H. Liu, L. Zhou, & Q. Liu, "Microstructural characteristics and mechanical properties of friction stir welded joints of Ti-6Al-4V titanium alloy", *Materials & Design*, Vol. 31, pp. 1650-1655, 2010.

- [48] M. B. Hariri, S. Shiri, Y. Yaghoobinezhad & M. M. Rahvard, "The optimum combination of tool rotation rate and traveling speed for obtaining the preferable corrosion behavior and mechanical properties of friction stir welded AA5052 aluminum alloy", *Materials & Design*, Vol. 50, pp. 620-634, 2013.
- Ti-6Al-4V joints", *Materials & Design*, Vol. 46, pp. 348-354, 2013.
- [38] A. Farias, G. Batalha, E. Prados, R. Magnabosco & S. Delijaicov, "Tool wear evaluations in friction stir processing of commercial titanium Ti-6Al-4V", *Wear*, Vol. 302, pp. 1327-1333, 2013.
- [39] H. Bisadi, M. Tour & A. Tavakoli, "The influence of process parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al 5083 Alloy lap joint", *American journal of Materials science*, Vol. 1, pp. 93-97, 2011.
- [40] T. Venugopal, K. S. Rao, & K. P. Rao, "Studies on friction stir welded AA 7075 aluminum alloy", *Trans. indian inst. met*, Vol. 57, pp. 659-663, 2004.
- [41] Z. Li, W. Arbegast, P. Hartley & E. Mletis, "Microstructure characterization and stress corrosion evaluation of friction stir welded Al 2195 and Al 2219 alloys", *ASM International, Trends in Welding Research(USA)*, pp. 568-573, 1999.
- [42] K. Surekha, B. Murty & K. P. Rao, "Microstructural characterization and corrosion behavior of multipass friction stir processed AA2219 aluminium alloy", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 202, pp. 4057-4068, 2008.
- [43] R. G. Kelly, B. Murtey & K. Rao, "Electrochemical techniques in corrosion science and engineering", 2002: CRC Press.
- [44] R. Bosch, J. Hubrecht, W. Bogaerts & B. Syrett, "Electrochemical frequency modulation: a new electrochemical technique for online corrosion monitoring", *Corrosion*, Vol. 57, pp. 60-70, 2001.
- [45] M. E. Orazem & B. Tribollet, "Electrochemical impedance spectroscopy", Vol. 48. 2001.
- [46] Y. Yang & L. Zhou, "Improving Corrosion Resistance of Friction Stir Welding Joint of 7075 Aluminum Alloy by Micro-arc Oxidation", *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 30, pp. 1251-1254, 2014.
- [47] C. Shen, J. Zhang & J. Ge, "Microstructures and electrochemical behaviors of the friction stir welding dissimilar weld", *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 23, pp. 532-535, 2011.