

بررسی اثر تغییرات زمان توقف ابزار در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (FSSW) بر ریزساختار آلیاژ Ti-6Al-4V

سعید نادر^{۱*}، مسعود کثیری^۲، مرتضی شمعیان^۳

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

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

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

*Saeed.nader@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۵/۲۶، تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۷/۰۲)

چکیده

در پژوهش حاضر اثر تغییرات زمان توقف ابزار به عنوان پارامتری تاثیرگذار بر ریزساختار جوش‌های اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. برای نیل به این هدف از ورق‌های آلیاژ Ti-6Al-4V با ضخامت ۱/۵ mm استفاده شد. سرعت دوران ابزار به طور ثابت ۱۲۵۰ rpm و زمان‌های توقف، ۷ و ۱۲ ثانیه در نظر گرفته شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که جوش‌ها فاقد هرگونه عیب حجمی می‌باشند. حضور دو منطقه‌ی SZ (منطقه اغتشاشی) و HAZ (منطقه متأثر از حرارت) در محل اتصال کاملاً مشهود است. ریزساختار در منطقه‌ی SZ بصورت α/β لایه‌ای در میان β ی اولیه و در منطقه‌ی HAZ بصورت ساختار دوفازی می‌باشد. افزایش زمان توقف ابزار در محل اتصال، درشتی ریزساختار را بدنبال دارد. همچنین افزایش زمان توقف ابزار، باعث افزایش در استحکام برشی اتصال می‌شود.

واژه‌های کلیدی:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، زمان توقف، تیتانیوم، ریزساختار.

۱- مقدمه

تحقیقاتی خود را جهت بررسی این فرآیند به دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی سرازیر نمایند [۱]. در سال ۲۰۰۱ فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (FSSW) به عنوان یک روش جایگزین مناسب برای فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای (RSW) توسط شرکت مزدا موتور و صنایع سنگین کاوازاکی ابداع و مورد استفاده قرار گرفت [۲]. در فرآیند FSSW یک ابزار چرخنده در داخل دو ورق که رویهم قرار داده شده‌اند فرو رفته و پس از توقفی کوتاه بیرون کشیده می‌شود.

فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) در سال ۱۹۹۱، توسط TWI برای اتصال دهی آلیاژهای آلومینیوم ابداع شد [۱]. سادگی فرآیند، هزینه‌ی پایین تجهیزات، قابلیت اتوماسیون، کیفیت جوش بسیار برتر و سالم‌تر نسبت به فرآیندهای ذوبی، حداقل میزان تنش‌های پسماند، اعوجاج کم و بالاخره خواص مکانیکی مطلوب و نزدیک به فلز پایه سبب شد که این فرآیند به سرعت در بخش‌های مختلف صنعتی بکار گرفته شده و شرکت‌های بزرگ تولیدی حجم وسیعی از بودجه‌های

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد اولیه

فلز پایه‌ی مورد استفاده در این تحقیق ورق نورد شده‌ی آلیاژ Ti-6Al-4V به ضخامت ۱/۵ mm می‌باشد که ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول ۱ (برحسب درصد وزنی) نشان داده شده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده در این تحقیق بر اساس درصد

وزنی

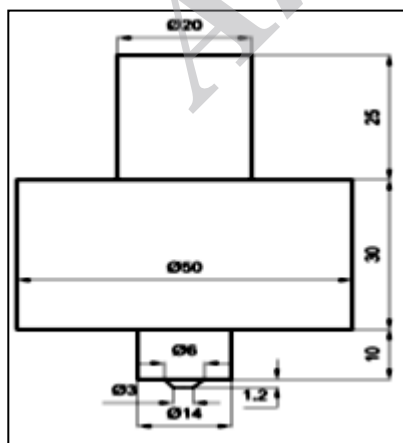
Al	V	Fe	Si	Mn	Other	Ti
۶/۵	۴	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۰۳	< ۰/۱۵	۸۹/۱۶

۲-۲- طراحی ابزار

جنس پین و شانه‌ی ابزار از آلیاژ کاربید تنگستن با بایندر کبالت (WC-CO) در نظر گرفته شد. هندسه و ابعاد پین و شانه در جدول ۲ و شکل ۲ آورده شده است.

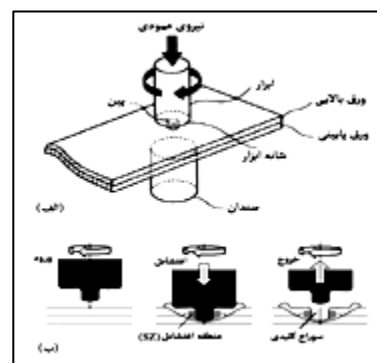
جدول (۲): مشخصات ابزار مورد استفاده در این تحقیق

جنس پین	کاربید تنگستن
جنس شانه ابزار	کاربید تنگستن
نوع شانه ابزار	تخت
نوع پین	مخروط ناقص
قطر پین	قطر (قطر بزرگ) ۶ mm - (قطر کوچک)
ارتفاع پین	۱/۲ mm
قطر شانه ابزار	۱۴ mm



شکل (۲): ابزار مورد استفاده در این تحقیق

هنگامی که پین در دو ورق فرو می‌رود، یک منطقه‌ی اغتشاش (SZ) شامل مواد متبلور شده‌ی دینامیکی در اطراف پین تشکیل می‌شود. با بیرون کشیدن پین ضمن پایان یافتن عملیات اتصال، سوراخی کلیدی در جوش به جای خواهد ماند (شکل ۱). این سوراخ کلیدی شکل با استفاده از ابزار و فیکسچرهای خاص می‌تواند پر شود [۳]. تحقیقات بسیاری بر روی FSSW آلیاژهای آلومینیوم که کاربردهای متنوعی در صنایع هوافضا، حمل و نقل و دریایی دارند، انجام شده و نتایج حاصل از این تحقیقات منتشر شده است. اما تاکنون تحقیقات قابل ذکر و منسجمی در زمینه‌ی FSSW تیتانیم و آلیاژهای آن منتشر نشده است، که این ناشی از چالش‌های موجود در فرآیند FSSW آلیاژهای تیتانیم می‌باشد، مسائلی مانند: دمای کاری بالا، نیاز به حفاظت محل اتصال در برابر اتمسفر محیط، کنترل دقیق پارامترهای فرآیند جهت دستیابی به دمای لازم در طی فرآیند، انتخاب ابزار از مواد خاص، مسئله‌ی سایش ابزار و احتمال شکست پین در حین فرآیند [۴-۶]. در FSSW پارامترهای مختلفی بر روی ریزساختار جوش‌های حاصله تاثیر گذار است. پارامترهایی مانند: هندسه‌ی ابزار، سرعت دوران ابزار، زمان توقف، نیروی عمودی، عمق نفوذ، آماده سازی سطح ورق‌ها و عملیات حرارتی بعد از جوشکاری. هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر تغییرات زمان توقف ابزار در نمونه بر ریزساختار اتصال نقطه‌ای در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای آلیاژ Ti-6Al-4V می‌باشد.



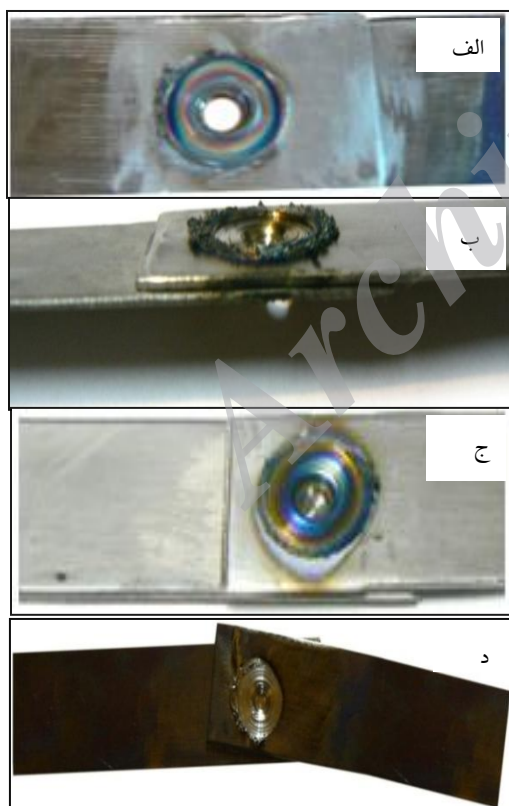
شکل (۱): شماتیکی از فرایند FSSW (الف): ابزار و طرح اتصال، (ب):

مراحل فرایند [۷]

است بیشترین مشکلات و عیوب ایجاد شده از نظر چشمی شامل موارد زیر می‌باشد:

- ۱- سوراخ شدن نمونه‌ها، ۲- ایجاد پلیسه، ۳- تغییر در رنگ نقطه جوش و ۴- حرکت قطعه کار در هنگام جوشکاری
- مجموعه مشکلات فوق بدلیل عدم انتخاب صحیح پارامترهای جوشکاری و هندسه ابزار می‌باشد.

شکل ۴ سطح نمونه نقطه جوش‌های سالم که توسط فرآیند FSSW با سرعت دوران ثابت ۱۲۵۰ rpm و زمان‌های توقف ۷ و ۱۲ ثانیه جوشکاری شده‌اند را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود سطح اتصال بدون سوراخ شدگی و بدون هیچ پلیسه‌ایی و دارای رنگی نقره‌ایی شکل بوده که بر اساس استاندارد AWS D 10.6-91 مورد قبول می‌باشد و همچنین نمونه‌ها در یک خط بصورت مستقیم می‌باشد که این ناشی از بهینه کردن مجموعه مشکلات عنوان شده می‌باشد.



شکل (۳): نمونه نقطه جوش‌های نامناسب ایجاد شده در ابتدای شروع جوشکاری: (الف): سوراخ شدن نقطه جوش، (ب): پلیسه پیش از حد، (ج): رنگ نقطه جوش و (د): چرخش قطعه کار در حین جوشکاری

۲-۳- آماده سازی

برای برش ورق‌ها و تبدیل آن‌ها به ابعاد مورد نظر (۱۰۰×۲۵mm) از دستگاه برش گیوتین استفاده شد. سطح اتصال با سنباده‌های نرم سنباده زنی شده تا هرگونه آلودگی اکسیدی احتمالی حذف شود. در مرحله‌ی بعد به منظور اسید شویی، قطعات به مدت ۵ دقیقه در محلول آبی ۵ درصد اسید هیدروفلوریک (HF) و ۴۵ درصد اسید نیتریک (HNO_3) قرار گرفت. پس از پایان اسیدشویی بلافاصله قطعات با آب گرم شستشو داده شد تا هرگونه اسید از سطح پاک گردد. در پایان با پارچه‌ی کتان‌ی رطوبت آنها گرفته شده و با دمش هوای گرم، کاملاً خشک شدند. عملیات تمیز کاری ۱۵ دقیقه قبل از انجام فرآیند جوشکاری صورت گرفت و سعی شد که زمان زیادی بین این دو مرحله تلف نگردد.

۲-۴- متغیرها و نحوه‌ی آزمایش

قطعات در سرعت دوران ثابت ۱۲۵۰ rpm و زمان‌های توقف ۷ و ۱۲ ثانیه، جوشکاری شده‌اند. جهت حفاظت از منطقه جوش، گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹ در حین فرآیند جوشکاری FSSW استفاده گردید. نمونه‌ها پس از ماند گرم تا ۲۵۰۰ سنباده زنی شده و عملیات پولیش نیز با استفاده از خمیر الماسه انجام شد. سپس نمونه‌ها توسط محلول شیمیایی کروم شامل: ml HF ۳، ml HNO_3 ۶ و مابقی H_2O اچ شدند و توسط میکروسکوپ نوری OLYMPUS مدل CK40M و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل LEO 435 VP مورد مطالعه قرار گرفتند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی کیفی

هر قطعه پس از جوشکاری به طور دقیق تحت بازرسی چشمی قرار گرفت. در شکل ۳، نمونه نقطه جوش‌های نامناسب ایجاد شده در ابتدای جوشکاری دیده می‌شود. همانطور که مشخص

۳-۲-۲- بررسی منطقه‌ای محل اتصال

شکل ۶ (الف) تصویر مقطع عرضی نمونه‌ی FSSW شده در سرعت دوران ۱۲۵۰ rpm و زمان توقف ۷ ثانیه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود هیچگونه عیب حجمی‌ای در جوش دیده نمی‌شود. اتصال شامل سه منطقه‌ی اغتشاش (SZ)، منطقه‌ی تحت تاثیر حرارت (HAZ) و فلز پایه (BM) می‌باشد. همانطور که در شکل ۶ (د) نشان داده شده است، وجود یک مرز تند بین ناحیه SZ و ناحیه HAZ نشان دهنده عدم وجود ناحیه TMAZ می‌باشد. بر خلاف آلیاژهای آلومینیوم، جوش‌های حاصل شده فاقد منطقه متاثر از عملیات ترمومکانیکی (TMAZ) می‌باشد [۸]. که این نتیجه نیز با نتایج گزارشات منتشر شده در خصوص جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای تیتانیوم تطابق دارد [۹-۱۲]. دلیل آن نیز به این خاطر است که آلیاژهای تیتانیوم دارای استحکام بالا و قابلیت هدایت حرارتی پایین تری نسبت به آلیاژهای آلومینیوم می‌باشند. به علت هدایت حرارتی پایین آلیاژهای تیتانیوم، حرارت تولید شده در فرآیند جوشکاری فاصله زیادی از منطقه جوش نمی‌گیرد. بنابراین ناحیه سرد و مستحکم‌تر اطراف ناحیه جوش در مقابل تغییر فرمی که ایجاد کننده منطقه TMAZ است، مقاومت می‌کند [۱۰].

۳-۲-۳- ناحیه اغتشاشی

طبق نظریه جوهاس و همکاران [۱۳]، نبود منطقه‌ی TMAZ را می‌توان اینگونه توجیه نمود که کرنش‌های قابل توجهی اعمال شده به منطقه‌ی SZ، بر کل این منطقه تاثیر یکسان گذاشته و تغییر فاز $\beta \rightarrow \alpha + \beta$ می‌تواند مکانیزمی برای اعمال این کرنش‌ها بر کل منطقه‌ی SZ باشد [۱۳]. هرچند که در برخی از تحقیقات قبلی که در زمینه‌ی FSW آلیاژ Ti-6Al-4V انجام شده است، منطقه‌ی TMAZ نیز مشاهده شده است [۱۳-۱۶]. شکل ۷ ریزساختار منطقه‌ی اغتشاشی را نشان می‌دهد.

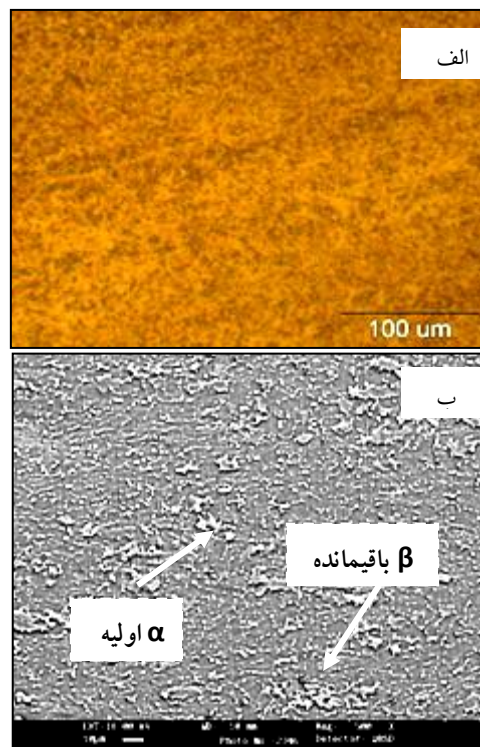


شکل (۴): سطوح جوشکاری شده‌ی آلیاژ Ti-6Al-4V توسط فرآیند FSSW

۳-۲-۳- بررسی ریزساختاری

۳-۲-۳-۱- فلز پایه

در شکل ۵ (الف) تصویر میکروسکوپ نوری و در شکل ۵ (ب) تصویر SEM از ریزساختار فلز پایه نشان داده شده است. ریزساختار این ناحیه شامل α اولیه و β باقیمانده می‌باشد. در تصویر SEM، α اولیه بصورت مناطق تیره و β باقیمانده بصورت مناطق روشن دیده می‌شود که در تصویر میکروسکوپ نوری این مناطق برعکس تصویر SEM می‌باشند و بصورت مناطق روشن (α) و مناطق تیره (β) دیده می‌شوند.



شکل (۵): ریزساختار فلز پایه: (الف) تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری (ب) تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترون روبشی

این منطقه که تحت تغییرات شدید پلاستیکی و حرارت اصطکاکی در طی فرآیند قرار می‌گیرد غالباً تحت عنوان منطقه‌ی تبلور مجدد یافته‌ی دینامیکی نامیده می‌شود. این به خوبی پذیرفته شده است که تبلور دینامیکی (DRX) در طی فرآیند FSW سبب ایجاد دانه‌های ریز تبلور مجدد یافته در منطقه‌ی اغتشاش می‌گردد [۱۷].

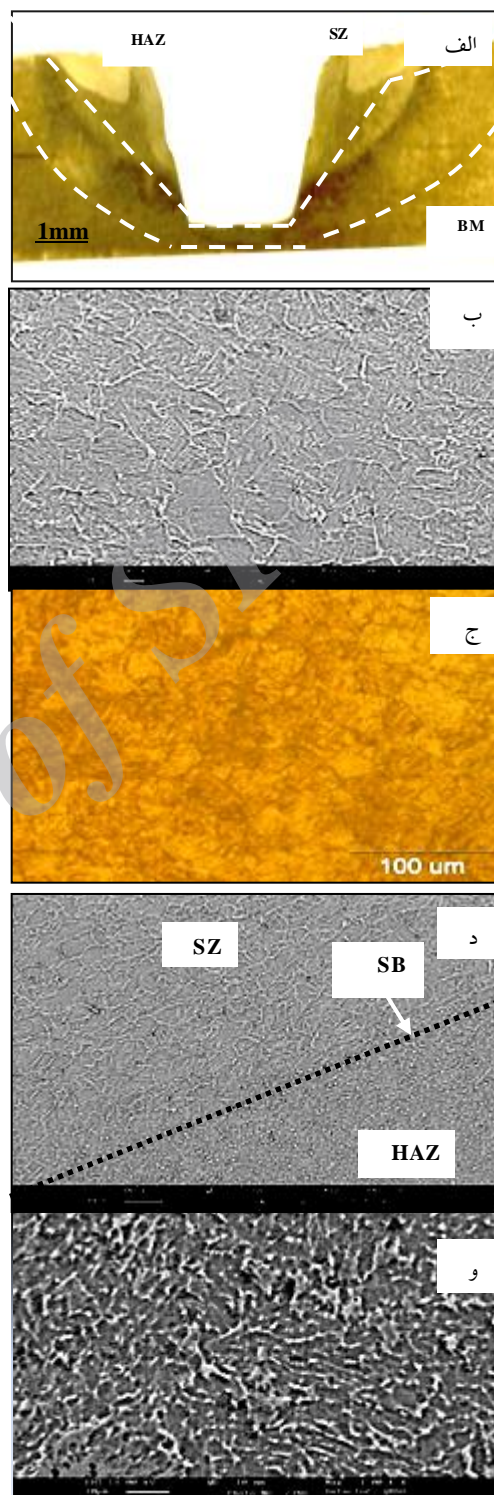
ریزساختار در منطقه‌ی اغتشاش شامل α/β لایه‌ای در میان β اولیه می‌باشد.

بنابراین حداکثر درجه حرارت در منطقه‌ی اغتشاش بالاتر از دمای تبدیل β بوده است زیرا در هنگام سرد شدن از این دما یک ساختار لایه‌ای در اثر استحاله‌ی فاز β تشکیل می‌گردد. مکانیزم تشکیل ریزساختار در ناحیه SZ را اینگونه می‌توان تشریح نمود که در طی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در مرحله حرارت‌دهی ناشی از اصطکاک بین ابزار و قطعه کار، دمای این ناحیه به بالاتر از دمای تبدیل β می‌رسد، در نتیجه ساختار تماماً بصورت تک فاز β تشکیل می‌شود.

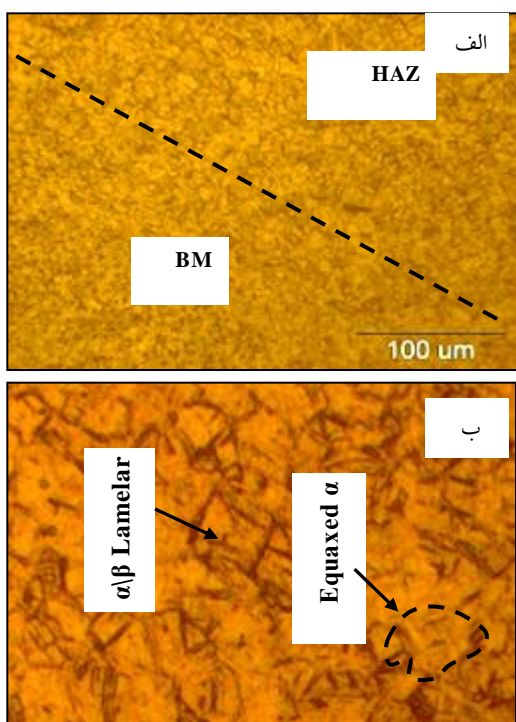
در اثر سرد کردن تعادلی، فاز α در نواحی پرنرژی بصورت همگن جوانه‌زنی می‌کند. این فرآیند ابتدا در مرز دانه‌های β که نیروی محرکه لازم جهت انجام تحول را فراهم می‌کند انجام می‌گیرد. اما صفحات وسیع که انرژی کمتری دارند آرامتر رشد می‌کنند که منجر به ایجاد تیغه‌های α می‌شود. این کلونی‌ها رشد می‌کنند تا هنگامی که به علت کاهش زیاد دما و یا برخورد آنها با یکدیگر، رشد آنها متوقف شود. در نتیجه دانه‌های β اولیه بصورت α/β لایه‌ای در میان β اولیه تبدیل می‌شود [۱۸].

۳-۲-۴- ناحیه متأثر از حرارت

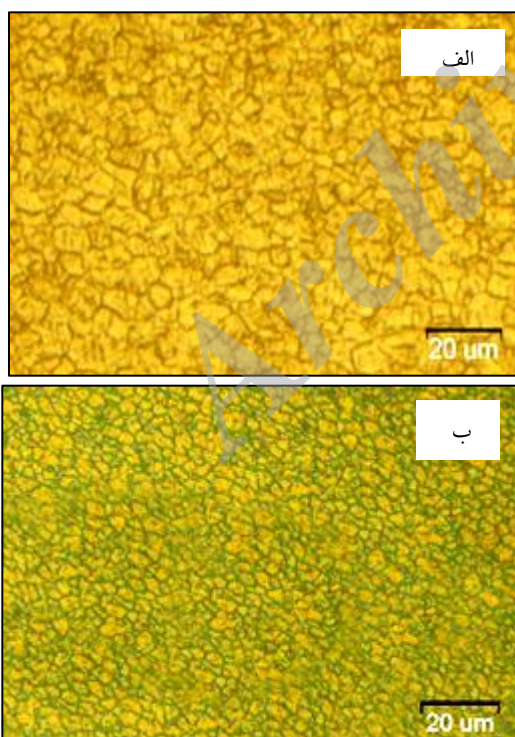
شکل ۸ ریزساختار در منطقه‌ی HAZ را نشان می‌دهد که بصورت ساختار دوفازی، شامل دانه‌های هم محور α و لایه‌ای α/β در میان β اولیه می‌باشد. در تحلیل ریزساختار منطقه‌ی HAZ، می‌توان گفت که پیک دمای در منطقه‌ی HAZ پایین‌تر از دمای تبدیل β است و سیکل سرد شدن از این پیک دمای سبب شکل‌گیری چنین ریزساختاری می‌گردد. مراحل



شکل (۶): (الف): تصویر مقطع عرضی نمونه ۱۲۵۰ rpm و ۷S، (ب): تصویر تهیه شده توسط SEM از منطقه اغتشاشی، (ج): تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری از منطقه اغتشاشی، (د): تصویر تهیه شده توسط SEM از منطقه HAZ و (و): تصویر تهیه شده توسط SEM از فلز پایه

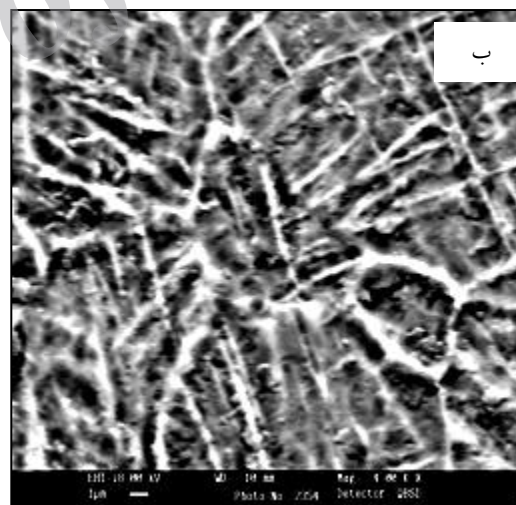
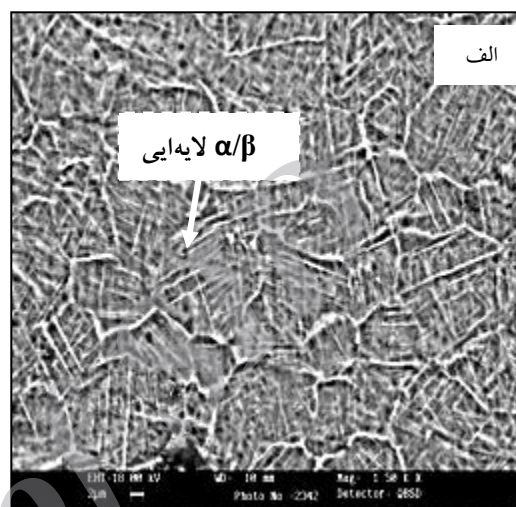


شکل (۸): تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری: (الف): از مرز بین HAZ و BM، (ب): از منطقه HAZ



شکل (۹): تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری از اثر تغییرات زمان توقف ابزار (s) بر ریز ساختار منطقه‌ی اغتشاشی (SZ) در سرعت دوران ثابت ۱۲۵۰rpm، (الف): ۱۲ s، (ب): ۷ s

شکل‌گیری ریزساختار منطقه‌ی HAZ را می‌توان به این صورت تشریح کرد که در طی مرحله‌ی حرارت دهی، فاز α/β در لایه‌ای تغییر شکل یافته، به فاز β که در دمای بالاتر پایدارتر است، تبدیل می‌گردد.



شکل (۷): تصویر تهیه شده توسط SEM: (الف): از منطقه SZ در بزرگنمایی ۴۰۰X و (ب): از منطقه SZ در بزرگنمایی ۱۵۰۰X

هنگامی که پیک دمایی پایین‌تر از دمای تبدیل β باشد، مقداری از α باقیمانده وجود خواهد داشت و به منظور کاهش سطح انرژی دانه‌های α ، فاز α باقیمانده بصورت هم‌محور در خواهد آمد [۸].

اندازه دانه‌های β اولیه را در بر خواهد داشت. افزایش در زمان توقف، موجب افزایش پیک دمایی شده و باعث می‌شود که در مدت زمان بیشتری در بالای دمای تبدیل β قرار گیرد، در نتیجه مقدار لایه‌های α - β نیز افزایش می‌یابد که این خود باعث افزایش استحکام برشی اتصال می‌گردد [۹-۱۸].

۴- نتیجه گیری

۱- بررسی‌های منطقه‌ای محل اتصال، حاکی از سه منطقه‌ی SZ، HAZ و BM و عدم حضور منطقه‌ی TMAZ در فرآیند FSSW آلیاژ Ti-6Al-4V می‌باشد.

۲- ریزساختار در منطقه‌ی SZ بصورت α/β لایه‌ای در میان β ی اولیه و در منطقه‌ی HAZ بصورت ساختار دوفازی شامل دانه‌های هم محور α و لایه‌ی α/β در میان β ی اولیه می‌باشد.

۳- افزایش زمان توقف ابزار، سبب افزایش حرارت ورودی در واحد حجم جوش شده و درشت شدن ریزساختار را در پی خواهد داشت.

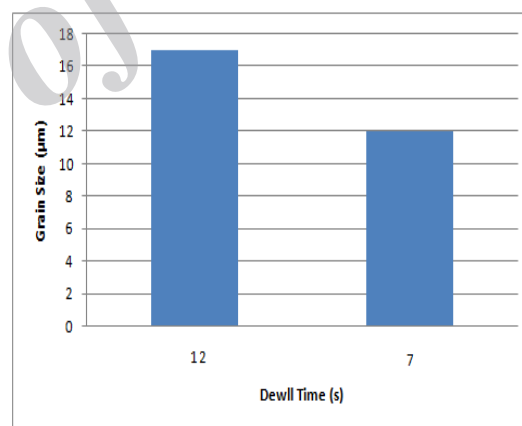
۴- افزایش در زمان توقف ابزار سبب افزایش در استحکام برشی اتصال می‌شود.

۵- مراجع

- [1] Fari, G. F. Batalha, E. F. Prados, R. Magnabosco & S. Delijaicov, "Tool Wear Evaluations in Fraction Stir Processing of Commercial Titanium Ti-6Al-4V", Science Direct, 2012.
- [2] M. Kurtulmus, "Friction Stir Spot Welding Parameters For Polypropylene Sheets", Department of Materials Technology, Vol. 7, pp. 947-956, 2012.
- [3] M. Kemal Bilici, "Application of Taguchi Approach to optimiz FSSW Parameters of Polypropylene", Materials and Design, Vol. 35, pp. 113-119, 2012.
- [4] K. V. Jata, P. R. Subramanian, A. P. Trapp & E. Helder, "Friction stir welding of titanium alloys for aerospace applications: microstructure and mechanical behavior", international offshore and polar engineering conference, pp. 22-27, 2004.

۳-۲-۵- بررسی اثر تغییرات زمان توقف ابزار

شکل ۹ تصویر میکروسکوپ نوری از منطقه‌ی اغتشاش در زمان‌های توقف ۷ و ۱۲ ثانیه را نشان می‌دهد. همچنان که مشاهده می‌شود افزایش در زمان توقف ابزار، افزایش میانگین اندازه‌ی دانه که به روش خط متقاطع اندازه‌گیری شده را در پی داشته است. بطوری که در زمان توقف ۷ ثانیه میانگین اندازه‌ی دانه $12 \mu\text{m}$ می‌باشد که با افزایش زمان توقف به $17 \mu\text{m}$ ثانیه، افزایش می‌یابد (شکل ۱۰). در توضیح این موضوع باید گفت که افزایش زمان توقف ابزار سبب افزایش حرارت ورودی در واحد حجم جوش و پیک دمایی بالاتر در منطقه‌ی اغتشاش شده و برای مدت زمان بیشتری ساختار در بالای دمای تبدیل β قرار می‌گیرد که این باعث درشت‌تر شدن ریزساختار و افزایش اندازه‌ی دانه‌های β ی اولیه می‌گردد [۸ و ۱۷].



شکل (۱۰): اثر تغییرات زمان توقف ابزار بر اندازه‌ی دانه در منطقه‌ی اغتشاش (SZ)

بررسی‌های حاصل از آزمایش کشش-برش نشان می‌دهد که افزایش در زمان توقف از ۷ ثانیه به ۱۲ ثانیه باعث افزایش در استحکام برشی می‌شود. در تحلیل نتایج آزمایش کشش-برش باید گفت در ناحیه اغتشاشی آلیاژ Ti-6Al-4V با ساختار لایه‌ای، اندازه‌ی دانه‌های β اولیه از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار بر خواص مکانیکی آلیاژ Ti-6Al-4V می‌باشد. همانطور که بیان شد، افزایش در زمان توقف ابزار سبب افزایش حرارت ورودی به محل اتصال و افزایش سطوح اتصال شده و در نتیجه افزایش

- [12] W. B. Lee, C. Y. Lee & W. S. Chang, "Microstructural investigation of friction stir welded pure titanium", *Material Letters*, Vol. 59, pp. 3315-3318, 2005.
- [13] M. C. Juhas, G. B. Viswanathan & H. L. Fraser, "Proceeding of the second symposium on friction stir welding, Gothenburg", Sweden, June, 2000.
- [14] M. C. Juhas, G. B. Viswanathan & H. L. Fraser, in: K. Jata, E. W. Lee, W. Frazier & N. J. Kim (Eds.), "Proceedings of the Lightweight Alloys for Aerospace Application", TMS, Warrendale, PA, USA, pp. 209-217, 2001.
- [15] T. J. Lienert, K. V. Jata, R. Wheeler & V. Seetharaman, in: *Proceedings of the Joining of Advanced and Specialty Materials III*, ASM, Materials Park, USA, pp. 160, 2001.
- [16] س. م. هاشمی فشارکی، م. جهازی و ع. خداپنده "بررسی اثر تغییرات سرعت پیشروی ابزار در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ Ti-6Al-4V" دوازدهمین کنفرانس ملی جوش و بازرسی، اصفهان، ص ۳۱۷-۳۰۸، آبان ۱۳۹۰.
- [17] R. S. Mishra & Z. Y. Ma, "Friction Stir Welding and Processing", *Mater. Sci. Eng*, Vol. 50, pp. 1-78, 2008.
- [18] G. Lutjering & J. C. Williams, "Titanium", Second Edition, Springer-Verlag, Berlin, 2003.
- [5] J. Ramirez & M. C. Juhas, "Microstructural evolution in Ti-6Al-4V friction stir welds", *Materials Science and Engineering*, pp. 426-432, 2003.
- [6] M. J. Russell & R. Freeman, "FSW for titanium", *Metal working production*, pp. 30, 2007.
- [7] Z. Feng, M. L. Santella & S. A. David, "Friction Stir Spot Welding of Advanced High-Strength Steels A Feasibility Study", *SAE International*, pp. 1-7, 2005.
- [8] Y. Zhang, Y. Sato, H. Kokawa, S. C. Park & S. Hirano, "Microstructural characteristics and mechanical properties of Ti-6Al-4V friction stir welds", *Material Science and Engineering*, Vol. 485 A, pp. 448-445, 2008.
- [9] Y. Zhang, Y. Sato, H. Kokawa, S. C. Park & S. Hirano, "Microstructural characteristics and mechanical properties of Ti-6Al-4V friction stir welds", *Material Science and Engineering*, Vol. 485 A, pp. 448-445, 2007.
- [10] H. J. Liu, L. Zhou & Q. W. Liu, "Microstructural characteristics and mechanical properties of friction stir welded joints of Ti-6Al-4V titanium alloy", *Materials and Design*, pp. 1650-1655, 2009.
- [11] L. Zhou, H. J. Liu & Q.W. Liu, "Effect of Rotation Speed on Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V friction stir welded joints", *Materials and Design*, 2009.