

اتصال همجنس و غیر همجنس آلیاژهای آلومینوم ۵۷۵۴ و ۶۰۶۳ به روش جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی

امین ربیعی زاده^{۱*}، احمد افسری^۲، فرهاد ارغوانی^۳، فرناز احمدی کیسمی^۴

- ۱- استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی شیمی و مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران
- ۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران
- ۳- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران
- ۴- دانش آموخته کارشناسی، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی شیمی و مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

ایران

*rabieezadeh@iaushiraz.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۲۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۱۷)

چکیده

فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از فرآیندهای نوین در اتصال فلزات گوناگون در حالت جامد است. در این پژوهش اتصال همجنس و غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم ۵۷۵۴ و ۶۰۶۳ مورد مطالعه قرار گرفت. با تغییر پارامترهای سرعت دورانی و سرعت پیشروی، نهایتاً بهترین سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۴ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب گردید. نمونه‌های جوشکاری شده توسط روش‌های بازرسی غیر مخرب از قبیل بازرسی چشمی و رادیوگرافی مورد بررسی قرار گرفتند و هیچگونه عیبی مشاهده نشد. در ادامه آزمون‌های استحکام کششی انجام شد که افزایش اندک در استحکام کششی این آلیاژها دیده شد. آزمون ریز سختی نیز بر روی نمونه‌ها صورت گرفت که در نتیجه ریز شدن دانه‌ها سختی اندکی کاهش پیدا کرد و نهایتاً ریزساختار ناحیه اتصال توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی مورد مشاهده و بررسی قرار گرفت. بررسی‌های ریزساختاری محل شکست نمونه‌ها نشان داد که شکست نرم مکانیزم اصلی شکست در اتصال‌های همجنس و غیرهمجنس است.

کلمات کلیدی:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، آلیاژ آلومینیم ۵۷۵۴، آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۳، اتصال غیر همجنس.

۱- مقدمه

چشمی برای جوشکار مشکل خواهد بود که وضعیت ماده را تشخیص دهد بنابراین ممکن است در اثر زیاد نگه داشتن منبع حرارت روی قطعه، حرارت فوق ذوب، افزایش سیالیت و جذب گاز اتفاق بیفتد. از طرفی انبساط و انقباض آلومینیم و آلیاژهای

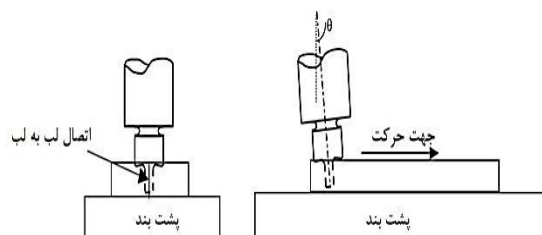
آلومینیم و آلیاژهای آن همیشه به عنوان یک فلز پر کاربرد در صنایع مختلف مطرح بوده‌اند، نقطه ذوب آلومینیم و آلیاژهای آن در حدود 450°C تا 660°C می‌باشد و چون در هنگام افزایش درجه حرارت و یا ذوب تغییر رنگ نمی‌دهند لذا از نظر

جهت آلیاژهای آلومینیوم، مس، منیزیم و حتی فولادها می‌باشد که بررسی‌های زیادی توسط محققین در این زمینه به عمل آمده است [۲۱-۲۰]. با توسعه و گسترده شدن این روش جوشکاری به علت راندمان بالا، عدم آلاینده‌گی زیست محیطی و حتی کاربرد جهت آلیاژهایی که به روش‌های مرسوم و متداول جوش پذیر نمی‌باشند، در صنعت کارایی بالایی پیدا کرده است و انتظار می‌رود که در آینده نزدیک جایگزین مناسبی برای روش‌های جوشکاری ذوبی باشد [۲۲-۲۳].

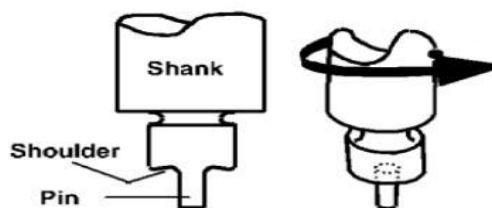
تاکنون جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی دسته‌های مختلفی از آلیاژهای آلومینیوم از قبیل سری ۵xxx و 6xxx انجام شده است [۲۴-۲۷]. همچنین اتصال به صورت غیر همجنس بین آلیاژهای سری‌های 2xxx و 6xxx، سری‌های 7xxx و 2xxx همینطور سری‌های 6xxx و 7xxx توسط محققان صورت گرفته است [۲۸-۳۰]. در سال‌های اخیر، نیاز صنایع ساخت و تولید به اتصال غیرهمجنس مواد توسعه پیدا کرده است اما اختلاف در خواص مکانیکی و خواص حرارتی این مواد، اتصال آن‌ها را با مشکلاتی همراه کرده است. به طور معمول، اتصال غیر همجنس فلزات و آلیاژها با استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با تغییر فرم پلاستیک شدید هر دو ماده همراه است. تغییر فرم پلاستیکی شدید منجر به تبلور مجدد دینامیکی دانه‌ها می‌شود [۳۱]. نکته بسیار مهمی که در اتصال فلزات و آلیاژهای غیرهمجنس حائز اهمیت است تشکیل فازهای بین فلزی و ساختارهای یوتکتیکی دما پایین ناشی از فرآیند جوشکاری است. این موضوع در تمامی تکنیک‌های جوشکاری مشاهده شده است و در تکنیک‌های جوشکاری ذوبی تشکیل فاز بین فلزی شدیدتر و با اندازه دانه‌های بزرگ‌تر نیز انجام می‌گیرد. این ترکیبات بین فلزی معمولا ساختاری سخت و شکننده دارند. همچنین بدلیل عدم پراکندگی یکنواخت و در واقع تجمع این فازها در نزدیکی مرز اتصال، استحکام مکانیکی جوش را به شدت تحت تاثیر خود قرار می‌دهند [۳۲].

از آنجایی که امروزه جوش حالت جامد آلیاژهای آلومینیوم توسعه‌ی فراوانی در صنایع مختلف داشته، در این تحقیق برای

آن در اثر جوشکاری و سرد شدن تقریباً دو برابر فولاد بوده و انقباض حجمی ناشی از انجماد در آن حدود ۴ تا ۶ درصد است که سبب تمرکز تنش‌های داخلی می‌شود که منجر به پیچیدگی، تاب برداشتن و تشکیل ترک خواهد شد. آلیاژهای آلومینیومی که در اثر عملیات حرارتی، سختی بالاتری پیدا کرده اند، در اثر حرارت ناشی از جوشکاری در مناطق مجاور خط جوش نرم می‌شوند. همچنین حرارت ناشی از جوشکاری باعث کاهش مقاومت به خوردگی آلومینیوم و آلیاژهای آن در منطقه مجاور خط جوش نیز می‌گردد، زیرا تغییرات دما سبب بروز تغییر در اندازه دانه‌ها و یا رسوب بعضی ترکیبات و فازهای بین فلزی و یا ناخالصی‌ها در مرزدانه‌ها می‌شود که همگی در کاهش مقاومت به خوردگی آلیاژ نقش به‌سزایی دارند [۱]. با توجه به موارد ذکر شده همواره جوشکاری آلومینیوم و آلیاژهای آن مشکلاتی به همراه داشته است. جوشکاری به روش اصطکاکی اغتشاشی یکی از روش‌های جوشکاری است که در حالت جامد انجام می‌گیرد. اولین بار این جوشکاری جهت آلیاژهای آلومینیوم در اواخر سال ۱۹۹۱ توسط موسسه جوشکاری انگلستان ابداع گردید، به طور شماتیک می‌توان روش جوشکاری و ابزار آن را در شکل‌های ۱ و ۲ ملاحظه کرد.



شکل (۱): شماتیک روش جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی



شکل (۲): شماتیک ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

این روش جایگزین مناسبی برای روش‌های جوشکاری ذوبی

بررسی‌های محققین نشان داده است که در جوشکاری غیرهمجنس به روش اصطکاکی اغتشاشی آلیاژی در سمت پیشرو قرار می‌گیرد که خواص بهتری بعد از فرآیند داشته باشد یا به عبارت دیگر در نتیجه فرآیند جوشکاری به ریزساختار بهتر یا خواص مکانیکی بالاتری برسد [۳۳]. بر این اساس باید آلیاژ ضعیف‌تر در سمت پیشرو قرار گیرد و در بررسی به عمل آمده آلیاژ ۶۰۶۳ در سمت پیشرو و آلیاژ ۵۷۵۴ در سمت پسرو قرار داشت.



شکل (۳): شماتیک و ابعاد ابزار طراحی شده جهت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

جهت بررسی کیفیت سطح و محل جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی، آزمون‌های غیر مخرب بازرسی چشمی و رادیوگرافی گاما بر روی نمونه‌ها انجام شد. جهت اندازه‌گیری میزان سختی نمونه از روش ریز سختی سنجی ویکرز استفاده گردید. این آزمون توسط دستگاه مدل DHV-100 انجام شد. ریزسختی سنجی با نیروی ۹/۸ نیوتن و در مدت زمان ۱۵ ثانیه انجام شد. به منظور بررسی‌های ریزساختاری، آماده‌سازی نمونه‌ها با استفاده از سمباده‌های ۴۰۰ تا ۲۰۰۰ انجام شد.

جدول (۱): درصد وزنی محلول پولات

Water	HF	HNO ₃	HCl
۱ میلی لیتر	۱ میلی لیتر	۶ میلی لیتر	۱۲ میلی لیتر

استحکام کششی با استفاده از دستگاه کشش universal مطابق با استاندارد ASTM E8-M انجام شد. سرعت فک دستگاه در این آزمون ۲ mm/min انتخاب گردید.

اولین بار آلیاژهای آلومینیم ۵۷۵۴ و ۶۰۶۳ در ۲ حالت همجنس و غیر همجنس جوش داده شد و سپس خواص مکانیکی و ریزساختار منطقه‌ی جوش مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش تحقیق

جوشکاری بر روی قطعاتی از جنس آلیاژ آلومینیم AA H22 5754 و AA 6063 T4 صورت گرفت. آنالیز کوانتومتری به منظور تعیین جنس نمونه‌ها انجام شد. نمونه‌ها از ورق‌ها با ضخامت ۶ میلی‌متر در ابعاد ۶۰ در ۱۲۰ میلی‌متر تهیه شد. به منظور جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، نمونه‌ها به صورت لب به لب در قالبی با ابعاد ۱۲۰ در ۱۲۰ میلی‌متر قرار گرفتند. جوشکاری در جهت عمود بر جهت نورد نمونه‌ها صورت گرفت. به منظور ساخت ابزار فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از فولاد گرمکار H13 که تا 52 ± 2 راکول سی سخت کاری شده، استفاده شد. این ابزار رزوه‌دار و دارای شانه‌ای با قطر خارجی ۱۸ میلیمتر، دارای پین به حالت مخروط ناقص طراحی و ساخته شده است. طول پین ۵/۶ میلیمتر که قطر دایره بزرگ و کوچک مخروط به ترتیب ۶ و ۳ میلیمتر در نظر گرفته شده است. از آنجایی که رزوه‌های روی ابزار چه در قسمت شانه و چه در قسمت پین ابزار به صورت چپ گرد طراحی گردید لذا بر اساس بررسی‌های تجربی و نتیجه شکست قطعات مشخص شد که به علت چپ گرد بودن رزوه‌های ابزار نتیجه مناسب در حالت چرخش پاد ساعت گرد ابزار بدست آمده است. در حین فرآیند دمای لحظه‌ای قطعات تحت فرآیند به کمک ترموکوپل مدل Elcometer اندازه‌گیری شد.

توسط محلول پولات به مدت ۱۰ ثانیه حکاکی گردید و ریز ساختار توسط میکروسکپ نوری و میکروسکپ الکترونی روبشی مدل VEGA/TEScan مورد بررسی قرار گرفت. آزمون

۳- نتایج و بحث

۱۴۰۰، ۱۶۰۰، و ۲۰۰۰ (دور بر دقیقه) و سرعت‌های پیشروی ۴ و ۸ (میلیمتر بر دقیقه) بر روی نمونه‌ها اعمال شد و بر اساس بررسی‌های چشمی و انجام آزمون‌های مخرب کیفی شکست، بهترین حالت برای سرعت دورانی و سرعت پیشروی انتخاب شد.

آنالیز شیمیایی حاصل از روش کوانتومتری آلیاژهای آلومینیم در جدول ۲ نشان داده شده است. ترکیب شیمیایی نمونه‌ها بر اساس استاندارد با ترکیب شیمیایی آلیاژهای آلومینیم ۵۷۵۴ و ۶۰۶۳ مطابقت دارد. در جدول ۳ خواص مکانیکی نمونه‌های خام ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود آلیاژ ۵۷۵۴ از خواص مکانیکی بهتری برخوردار است. سرعت‌های دورانی ۱۰۰۰،

جدول (۲): آنالیز شیمیایی انجام شده بر روی نمونه‌ها به روش کوانتومتری

نمونه	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti
1.AA5754	96.1	0.068	0.226	0.052	0.279	3.06	0.017	0.123	<0.005	0.018
2.AA6063	98.8	0.389	0.177	0.024	0.014	0.479	<0.005	0.005	0.007	0.005

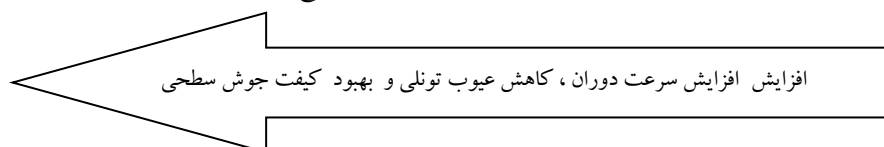
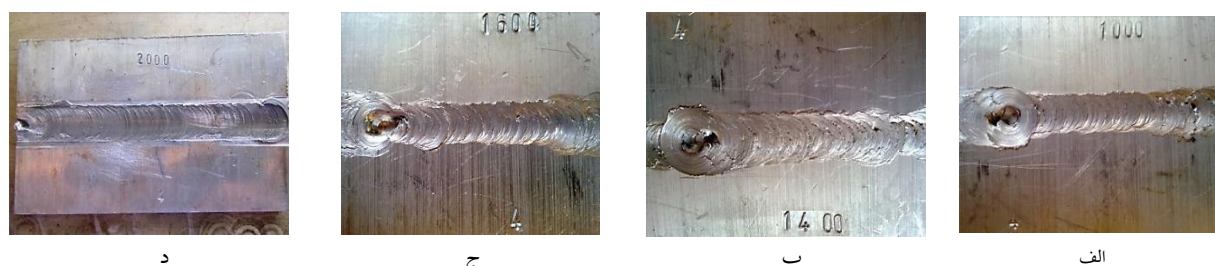
جدول (۳): خواص مکانیکی نمونه‌ها

نمونه	Yield Stress N/mm2	UTS N/mm2	Strain at Fracture (%)	Hardness(BHN)
1- AA5754	145	225	۳۷.۵۳	76
2- AA6063	105	143	۱۶.۳۳	50

لحاظ عدم تولید عیوب تونلی و بهبود کیفیت سطحی، سرعت پیشروی ۴ میلیمتر بر دقیقه و سرعت دوران ۲۰۰۰ دور بر دقیقه انتخاب شد. این نتیجه‌گیری، بر اساس بررسی‌های چشمی و انجام آزمون مخرب کیفی شکست بر روی نمونه‌های اولیه صورت پذیرفته است. در شکل (۴) تغییرات پروفیل جوشکاری برحسب سرعت دورانی و بدست آمدن بهترین پروفیل در سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه مشاهده می‌شود. پس از آزمایش‌ها و بررسی‌ها مختلف در جهت رسیدن به بهترین کیفیت سطح و دستیابی به جوشی عاری از عیب متغیرهای جوشکاری مطابق جدول (۴) انتخاب شد.

پس از مطابقت با استاندارد اروپایی در خصوص ترکیب شیمیایی آلومینیم و آلیاژهای آن (BS EN 573-3) مشخص گردید نمونه اول آلیاژ آلومینیم 5754 H22 Al و نمونه دوم آلیاژ آلومینیم 6063 T4 می‌باشد و بنا بر خواص مکانیکی ارائه شده نشان می‌دهد که نمونه اول از سری 5XXX، آلیاژهای آلومینیم منیزیم کارسخت شده توسط نورد می‌باشد که سختی آن یک چهارم سختی بیشینه است و نمونه دوم از سری 6XXX، آلیاژهای آلومینیم می‌باشد که رسوب سختی به فرم طبیعی صورت گرفته است.

پس از آزمایش‌های زیاد جهت تنظیم متغیرهای ماشین، شامل سرعت پیشروی و سرعت دوران، با توجه به شکل ابزار و زاویه تمایل در راستای دستیابی به اتصالی با بهترین کیفیت جوش از



شکل (۴): نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت پیشروی ۴ میلیمتر بر دقیقه. سرعت دورانی بر حسب دور بر دقیقه: (الف): ۱۰۰۰، (ب): ۱۴۰۰، (ج): ۱۶۰۰ و (د): ۲۰۰۰

عیب بودند. در شکل ۶ تصاویر رادیوگرافی نمونه بیانگر عدم وجود عیوب در جوش‌ها می‌باشد.

در شکل ۷ الف نمودار تنش- کرنش فلز پایه و اتصال آلیاژ آلومینیوم ۵۷۵۴ مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود استحکام و کرنش قطعه جوشکاری شده از فلز پایه کمتر است که این کاهش استحکام را می‌توان به تغییر ریز ساختار نمونه در نتیجه ی حرارت ایجاد شده در فرآیند نسبت داد.

از آنجایی که آلیاژ آلومینیوم سری ۵xxx استحکام خود را در نتیجه کارسختی انجام شده در حین فرآیند نورد بدست می‌آورد پس انجام فرآیند جوشکاری در ناحیه متاثر از حرارت به دلیل حرارت جذب شده، آنیل شده و استحکام خود را از دست می‌دهد. علاوه بر این رشد دانه‌ها به دلیل حرارت جذب شده در ناحیه متاثر از حرارت عامل دیگری برای افت خواص مکانیکی در این ناحیه می‌باشد و لذا همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود خواص مکانیکی قطعه جوشکاری شده نسبت به فلز پایه کمتر است.

جدول (۴): پارامترهای جوشکاری

پارامترهای جوشکاری	مقادیر و توضیحات
سرعت دورانی ابزار	۲۰۰۰ دور بر دقیقه
سرعت پیشروی ابزار	۴ میلیمتر بر دقیقه
تعداد عبورها	۱ و ۲ عبور
هندسه پین	مخروطی رزه دار
زاویه شانه با سطح افق	۵ درجه
عمق نفوذ شانه ابزار در ورق	۰/۳ میلیمتر

جهت بررسی کیفیت سطح و محل جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی بازرسی چشم از نمونه‌ها انجام شد و هیچ عیبی مشاهده نگردید (شکل ۵).

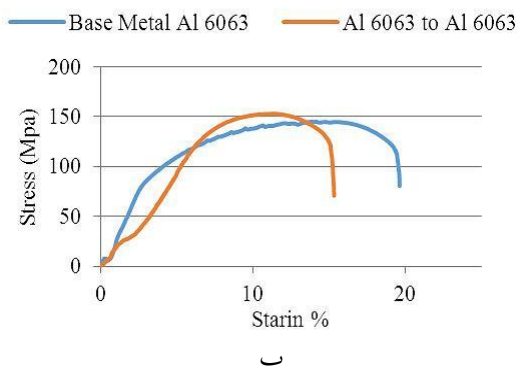
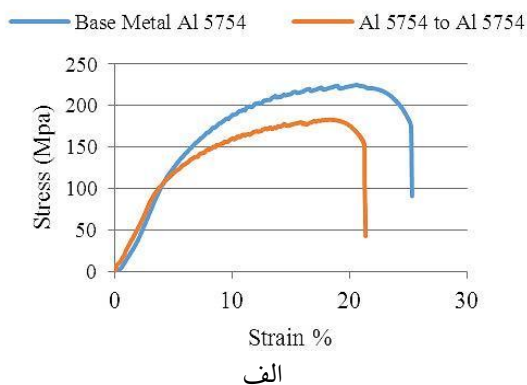


شکل (۵): جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۵۷۵۴ به ۶۰۶۳

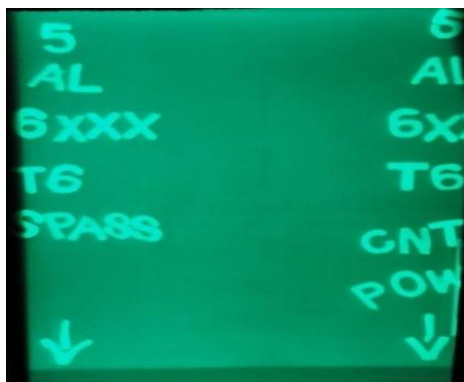
در آزمون غیرمخرب رادیوگرافی که به منظور شناسایی عیوب انجام شد، هیچ عیبی گزارش نگردید و کلیه جوش‌ها عاری از

سانتی گراد اندازه گیری گردید، خواص آلیاژ منطقه جوش را کمی بهبود بخشیده است و بر میزان تنش نهایی افزوده شده است، این شکست در تنش ۱۵۴ MPa رخ داده است. افزایش اندک استحکام کششی این آلیاژ را می توان به ریز شدن دانه ها و کارسختی اعمال شده در نتیجه فرآیند نسبت داد اما حل شدن رسوبات در نزدیکی مرز دانه ها سبب ایجاد مکان های ضعیفی در ساختار می شود که منجر به افت کرنش شکست این آلیاژ می شود.

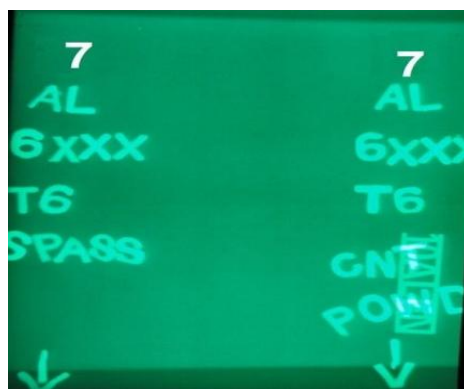
با توجه به اینکه جوشکاری به صورت غیر مشابه انجام شده و نظر به اینکه این دو فلز استحکام کشش متفاوت دارند که به ترتیب ۲۲۵ MPa و ۱۴۳ MPa اندازه گیری شده است، انتظار می رود که شکست اتصال غیر همجنس از ناحیه متأثر از حرارت آلیاژ با استحکام کشش کمتر یعنی آلیاژ ۶۰۶۳ صورت گیرد [۳۴-۳۵].



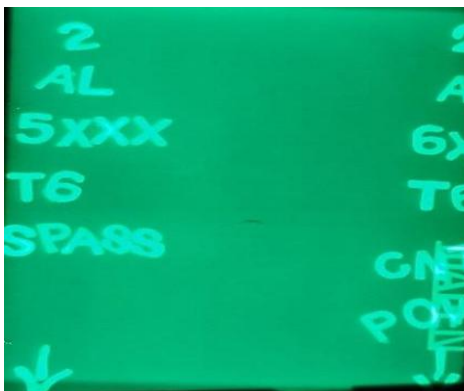
شکل (۷): نمودار تنش - کرنش از نمونه های جوشکاری شده اغتشاشی اصطکاکی آلیاژ آلومینیوم: (الف): ۵۷۵۴ به ۵۷۵۴ و (ب): ۶۰۶۳ به ۶۰۶۳



الف



ب

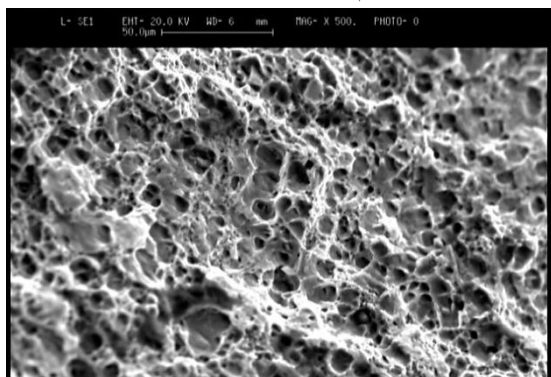


ج

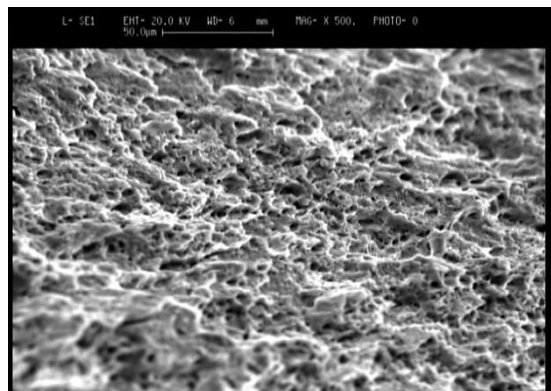
شکل (۶): تصویر رادیوگرافی از جوش آلیاژ آلومینیوم الف. ۵۷۵۴ به ۵۷۵۴؛ ب. ۶۰۶۳ به ۶۰۶۳ و ج. ۵۷۵۴ به ۶۰۶۳

بر طبق شکل ۷ ب با مقایسه و بررسی منحنی تنش - کرنش اتصال به روش اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم Al 6063 T4 به آلیاژ مشابه Al 6063 T4 و همچنین مشاهده میزان کرنش در نقطه شکست می توان نتیجه گرفت بر اثر حرارت ایجاد شده که طی پروسه جوشکاری حدود ۴۰۰ درجه

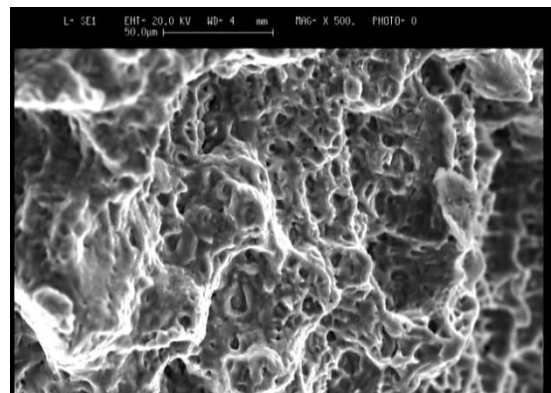
خواص مکانیکی در ناحیه اغتشاش می شود که موید شکست این نمونه از ناحیه اغتشاش است. با توجه به محل شکست نمونه های اتصال همجنس و غیرهمجنس می توان نتیجه گرفت که اتصال برقرار شده به روش اصطکاکی اغتشاشی عاری از عیوبی نظیر حفره و عدم نفوذ است.



الف



ب

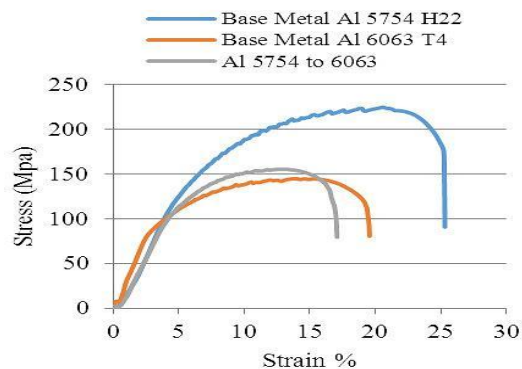


ج

شکل (۱۰): تصاویر میکروسکوپی از ناحیه شکست نمونه های جوشکاری شده اغتشاشی اصطکاکی آلیاژ آلومینیوم: (الف): ۵۷۵۴ به ۵۷۵۴، (ب):

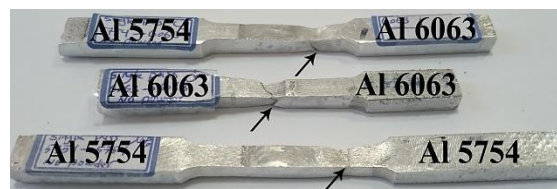
۶۰۶۳ به ۶۰۶۳ و (ج): ۶۰۶۳ به ۵۷۵۴

در شکل ۸ نمودار تنش- کرنش اتصال غیر هم جنس آلیاژهای ۶۰۶۳ و ۵۷۵۴ مشاهده می شود. همانطور که انتظار می رود، نمودار تنش- کرنش اتصال غیر همجنس باید مشابه به نمودار تنش- کرنش اتصال همجنس آلیاژ ضعیف تر باشد که با مقایسه شکل ۷ الف و ب این فرض تایید می شود.



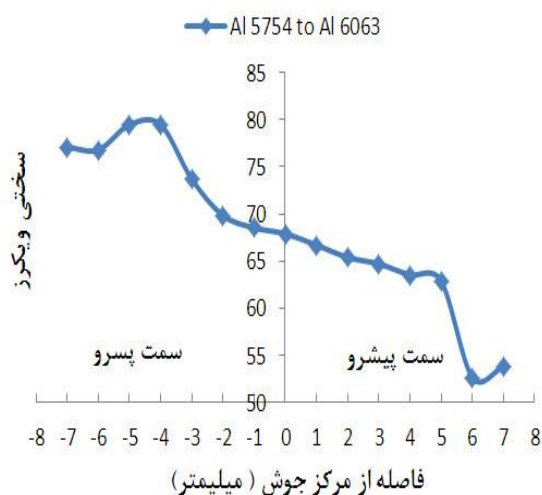
شکل (۸): نمودار تنش - کرنش از نمونه های جوشکاری شده آلیاژ ۵۷۵۴ به ۶۰۶۳

تصویر ماکروسکوپی نمونه های آزمون کشش بعد از شکست در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل (۹): تصاویر ماکروسکوپی قطعات بعد از آزمون کشش

در جوشکاری همجنس آلیاژ آلومینیوم ۵۷۵۴ و جوشکاری غیر همجنس آلیاژ آلومینیوم ۵۷۵۴ به ۶۰۶۳، نمونه آزمون کشش از محل ناحیه متأثر از حرارت دچار شکست شده است. افت خواص مکانیکی در ناحیه متأثر از حرارت به دلیل رشد دانه ها، سبب تمرکز شکست در این ناحیه شده است. در جوشکاری همجنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۳، شکست در ناحیه اغتشاش رخ داده است. آلیاژهای آلومینیوم سری ۶XXX، از دسته آلیاژهای رسوب سخت شونده می باشند. در حین فرآیند به دلیل حرارت بالای ایجاد شده در ناحیه اغتشاش (حدود ۴۰۰ °C) رسوبات در ناحیه اغتشاش حل می شوند که به نوبه خود سبب افت



ج

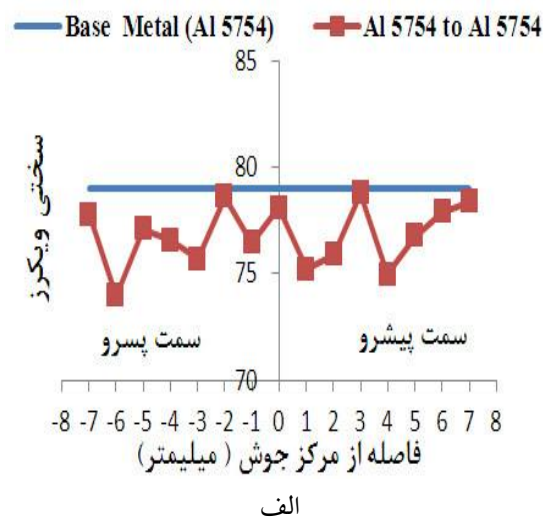
شکل (۱۱): مقایسه ریزسختی نمونه‌های جوشکاری شده اغتشاشی اصطکاکی آلیاژ آلومینیوم: (الف): ۵۷۵۴ به ۵۷۵۴، (ب): ۶۰۶۳ به ۶۰۶۳ و (ج): ۶۰۶۳ به ۵۷۵۴

متوسط میزان ریزسختی اندازه‌گیری شده در پروفیل جوش حدود ۷۷ ویکرز گزارش گردید. این میزان تقریباً در عرض پروفیل جوش یکسان است و دارای تغییرات بسیار ناچیزی می‌باشد. در آلیاژهای آلومینیوم سری ۵xxx سختی آلیاژ در نتیجه‌ی کارسختی ناشی از فرآیند نورد برای تولید ورق می‌باشد، سیکل حرارتی و کارسختی اعمال شده در حین فرآیند اصطکاکی- اغتشاشی سبب بازیابی ساختار کارسخت شده اولیه و ریزدانه شدن می‌شود که برآیند این اثرها سبب افت اندک سختی می‌شود.

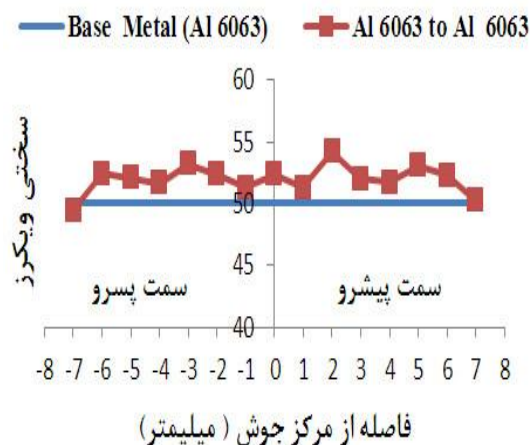
بر طبق شکل ۱۱ ب میزان سختی در نمونه‌های جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی جهت آلیاژ آلومینیوم Al6063 T4 به Al6063 T4 به روش ریزسختی میکرو ویکرز اندازه‌گیری گردید. در پروفیل سختی متوسط سختی حدود ۵۲ ویکرز گزارش گردید، این میزان سختی تقریباً در عرض پروفیل جوش به طور یکسان توزیع شده است و در حدود سختی فلز پایه می‌باشد و دارای کاهش یا افزایش بسیار ناچیزی در مقطع پروفیل جوش می‌باشد. همانطور که گفته شد در نتیجه‌ی فرآیند اصطکاکی- اغتشاشی افزایش اندکی در

در شکل ۱۰، تصاویر میکروسکوپی از ناحیه شکست اتصال همجنس و غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیوم ۵۷۵۴ و ۶۰۶۳ مشاهده می‌شود. بر اساس دیپل‌های موجود در سطح شکست، همانطور که انتظار می‌رود مکانیزم شکست آلیاژهای آلومینیوم شکست نرم می‌باشد. عدم وجود ناحیه شکست ترد در تصاویر میکروسکوپی سطح شکست نشان‌دهنده عدم تشکیل فاز ترد در حین فرآیند اتصال می‌باشد.

ریز سختی در نمونه‌های جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم Al 5754 H22 به Al 5754 H22 به روش ریز سختی میکرو ویکرز اندازه‌گیری شده است، در شکل ۱۱ الف قابل مشاهده است.

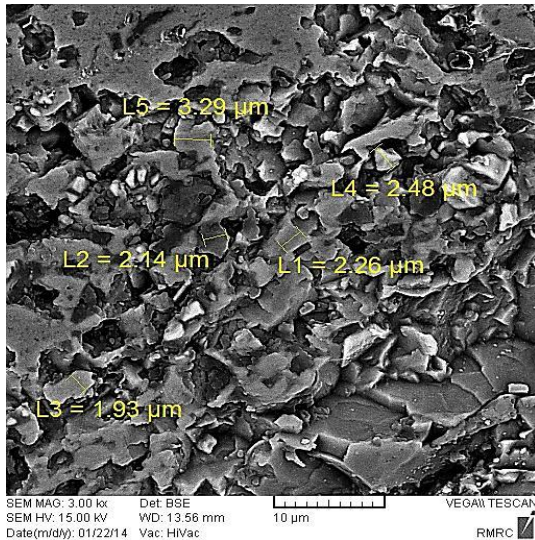


الف



ب

دانه‌بندی اولیه کاهش یافته است. این کاهش ابعاد ریزساختاری در منطقه جوش نسبت به ابعاد دانه‌بندی فلز پایه قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۱۳): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از منطقه جوش H22

Al 6063 T4 به Al5754

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش اتصال همجنس و غیرهمجنس آلیاژهای آلومینوم ۵۷۵۴ و ۶۰۶۳ به روش جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی انجام شد. خلاصه مهمترین و اصلی ترین نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

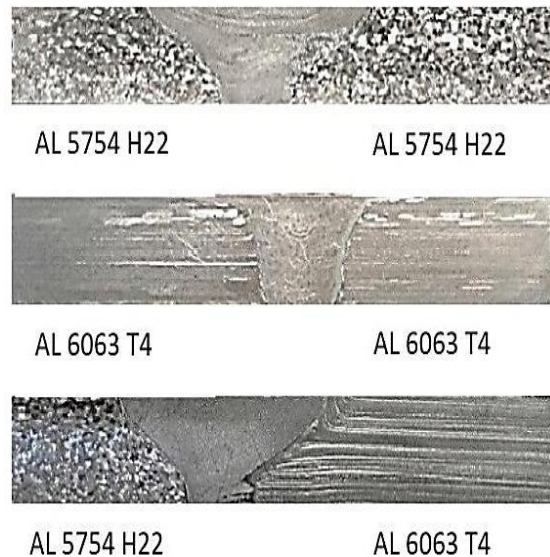
۱- با تنظیم سرعت دورانی و سرعت پیشروی دست یافته به ترتیب ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و ۴ میلیمتر بر دقیقه و بنا بر طراحی ابزار مذکور اتصالی عاری از عیب جهت آلیاژهای آلومینوم امکان پذیر است.

۲- در حالت جوشکاری دو آلیاژ غیر مشابه مانند آلومینوم Al6063 T4 و Al5754 H22 قرار گرفتن در سمت پیشرو یا پسرو اهمیت دارد و آلیاژ Al6063 T4 که سختی کمتری دارد، بایستی در سمت پیشرو قرار گیرد.

استحکام کشش مشاهده می‌شود، لذا افزایش اندک سختی در این آلیاژها دور از انتظار نیست.

همانگونه که در شکل ۱۱ مشخص است میزان سختی اولیه آلیاژ آلومینوم Al 5754 H22 حدود ۷۹ ویکرز و جهت آلیاژ Al 6063 T4 حدود ۵۰ ویکرز اندازه گیری شده است. پس از جوشکاری به روش اصطکاکی اغتشاشی و توزیع میزان سختی در پروفیل جوش می‌توان در مورد این نمونه این نتیجه را گرفت که توزیع میزان سختی در پروفیل جوش وابسته به فاصله مرکز جوش تا فلز پایه می‌باشد و این میزان سختی تقریباً از یک رابطه خطی بین سختی دو آلیاژ پیروی نماید.

نتایج بررسی های ریزساختاری در تصاویر ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. بر اساس تصویر ماکروساختار شکل ۱۲ هیچ یک از عیوب معمول فرآیند اصطکاکی- اغتشاشی مشاهده نمی‌شود، در عین حال تغییرات اندازه دانه از فلز پایه به ناحیه اغتشاش قابل تشخیص است.



شکل (۱۲): تصویر ماکروساختار ناحیه اتصال

شکل ۱۳ اندازه دانه‌ها در ناحیه اتصال دو آلیاژ Al5754 H22 به Al6063 T4 را نشان می‌دهد. این ابعاد در مقایسه با ابعاد

۵- مراجع

- "Effect of processing parameters on the corrosion behaviour of friction stir processed AA2219 aluminum alloy", *Solid state science*, Vol. 11, pp. 907-917, 2009.
- [9] Rhodes, C. G. Mahoney, M. W. W.H.Bingel & M. Calabrese, "Fine-grain evaluation friction stir processed 7050 aluminum", *Scripta materialia*, Vol. 40, pp. 254-256, 2003.
- [10] R. S. Mishra & Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*", Vol. 50, No. 1-2, pp. 1-78, 2005.
- [11] Abdollah-Zadeh, T. Saeid & B. Sazgari, "Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminum/copper lap joints", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 460, pp. 535-538, 2008.
- [۱۲] ج. تیمور نژاد، "تاثیر عوامل جوشکاری بر روی جوش لب به لب همزن اصطکاکی ورق های مس"، فصلنامه مکانیک هوافضا ISSN 1609-5707، ۱۳۹۱.
- [۱۳] م. شهبازنیا، م. ک. بشارتی گیوی، م. تاجداری، "مطالعه خواص مکانیکی و سختی اتصال ورقهای غیرهمجنس آلایژ آلومینیوم 7075 T6 و برنج به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی"، اولین همایش سراسری صنعت خودرو، اهواز، آموزشکده فنی و حرفه ای سما واحد اهواز، ۱۳۹۱.
- [14] C. G. Rhodes, M. W. Mahoney, W. H. Bingel & M. Calabrese, "Fine-grain evolution in friction-stir processed 7050 aluminum", *Scripta Materialia*, Vol. 48, No. 10, pp.1451-1455, 2003.
- [15] B. M. Darras, M. K. Khraisheh, F. K. Abu-Farha & M. A. Omar, "Friction stir processing of commercial AZ31 magnesium alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191, pp. 77-81, 2007.
- [۱۶] ص. فرجی، ر. سلطانی پور و خ. فرمنش، "سرعت پیشروی بر میکرو ساختار و خواص مکانیکی اورانیوم ۵۰۸۳ در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی"، همایش صنایع معدنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۲ خرداد ماه.
- [۱۷] ف. فخاری، پ. اسدی، م. ک. بشارتی گیوی و ج. تیموری، "اثر فرآوری اصطکاکی بر خواص مکانیکی آلایژ ریختگی منیزیم"
- [1] Mathers, "The welding of aluminium and its alloys. Woodhead publishing limited. Sbington hall", Abington Cambridge CB1 6AH, ISBN, Vol. 1 pp. 85573-567 9, 2000.
- [۲] ح. رضایی و ج. بیسادی، "مطالعه تجربی پارامترهای تاثیرگذار در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر کیفیت جوش لب به لب آلومینیوم"، دهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشگاه صنعتی بابل، صفحه ۱۰-۱۲، اسفند.
- [3] M. Azizieh, A. H. Kokabi & P. Abachi, "Effect of rotational speed and probe profile on microstructure and hardness of AZ31/Al2O3 nanocomposites fabricated by friction stir processing. *Materials & Design*", Vol. 32, No. 4, pp.2034-2041, 2011.
- [۴] م. م. اتابکی و آ. بیدگی. زارع، "بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری جوشکاری اصطکاکی"، دومین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی و انجمن ریخته گری ایران، AA1030 اغتشاشی آلایژ دانشگاه آزاد کرج، صفحه ۲۸-۲۹ آبان ماه، ۱۳۸۷.
- [۵] م. ع. صفرخانیان، م. گودرزی و م. ع. بوتراپی، "اثر سرعت جوشکاری اصطکاکی اختلاطی (FSW) بر خواص مکانیکی اتصال آلایژ آلومینیوم 2024-T8"، دومین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی و انجمن ریخته گری ایران، ۱۳۸۷.
- [۶] ت. قربانزاده، ع. ر. سلطانی پور و خ. فرمنش، "ارزیابی رفتار مکانیکی آلایژ آلومینیوم 2024-T3 جوش داده شده به روش اصطکاکی اغتشاشی"، یازدهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید ایران، ۱۳۸۹.
- [7] K. Elangovana & V. Balasubramanian, "Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy", *journal of materials processing technology*, Vol. 200, pp. 163-175, 2008.
- [8] K. Surekha, B. S. Murty & K. Prasad Rao,

Journal published monthly by the World Academy of Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 33, pp. 93-96, 2008.

[28] L. Dubourg, A. Merati & M. Jahazi, "Process optimization and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin", *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 3324-3330, 2010.

[۲۹] م. شاه حیدری و ح. بیسادی، "مطالعه تجربی رفتار مکانیکی آلیاژهای آلومینیم غیر همجنس AA7277 T6-AA6061- T6"، نخستین همایش منطقه ای مهندسی مکانیک، تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق، ۱۳۸۹.

[30] M. K. Besharati Givi & P. Asadi, *Advances in Friction Stir Welding and Processing*, Elsevier, 2014.

[31] Y. S. Sato, S. H. C. Park, M. Michiuchi & H. Kokawa, "Constitutional liquation during dissimilar friction stir welding of Al and Mg alloys", *Scripta Materialia*, Vol. 50, pp. 1233-1236, 2004.

[32] C. Jonckheere, B. D. Meester, A. Denquin & A. Simar, "Torque, temperature and hardening precipitation evolution in dissimilar friction stir welds between 6061-T6 and 2014-T6 aluminum alloys" *Jorunal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, pp. 826-837, 2013.

[۳۳] ح. آقاچانی دراز کلاه، م. الیاسی و م. حسین زاده، "بررسی شکل گیری عیوب و لایه های بین فلزی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیم AA1100 به فولاد A441"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال نهم، شماره ۳، ۱۳۹۴، صفحه ۲۱۹-۲۳۳.

[۳۴] م. صادقی گوغری، م. کتیری و ک. امینی، "بررسی نسبت سرعت دوران به پیشروی ابزار در جوشکاری همزن اصطکاکی اتصال غیرهمجنس آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ به تیتانیوم خالص تجاری"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال نهم، شماره ۳، ۱۳۹۴، صفحه ۲۵۷-۲۶۶.

یازدهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشگاه تبریز، صفحه ۲۷-۲۹، مهرماه، ۱۳۸۹.

[18] T. Khaled, AN OUTSIDER LOOKS AT FRICTION STIR WELDING, REPORT #: ANM-112N-05-06 .JULY 2005.

[19] W. M. Thomas: First International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, California, USA, Vol. 10, pp. 14-16, 1999.

[20] T. J. Lienert & J. E. Gould: First International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, California, USA, Vol. 10, pp. 14-16, 1999.

[21] T. J. Lienert, W. L. Stellwag, JR., B. B. Grimmett and R. W. Warke: *Welding Journal*, Vol. 82, No. 1, pp. 1-9, 2003.

[22] ASM Handbook, "Welding, Brazing and Soldering", Vol. 6, 2008.

[23] W. M. Thomas et al., US Patent, No. 5, pp 460-317, 1991.

[24] G. Faraji, P. Asadi, "Characterization of Al/alumina nanocomposite produced byFSP", *Material Science and Engineering*, Vol. 528A, pp. 2431-2440, 2011.

A. Ehab, E. L. Danaf, M. E Magdy & M. S. Soliman, "Friction stir processing: An effective technique to refine grain structure and enhance ductility", *material and design*, Vol. 401, pp. 209-216, 2010.

[25] E. A. El-Danaf, M. M. El-Rayes & M. S. Soliman, "Friction stir processing: An effective technique to refine grain structure and enhance ductility", *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 1231-1236, 2010.

[26] D. Hofman, C. Vecchio & S. Kenneth, "submerged friction stir processing (SFSP): An improved method for cration ultra-fine-grained bulk materials", *Materials Science and Engineering*, Vol. 402A, pp. 234-241, 2005.

[27] Dobrzyńska & A. Pietras, "Microstructure and properties of FSW joints of 2017A/6013 aluminum alloys sheets", *International Scientific*