

بهبود قابلیت تحمل بار در موضع اتصال آلومینیوم ۱۱۰۰ توسط سنتز درجای Al-Cr در حین فرایند FSSW

سعید مطلبی فشارکی^۱، مسعود مصلائی پور^{۲*}، علیرضا مشرقی^۲، سید صادق قاسمی بنادکوکلی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده معدن و متالورژی، پردیس فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، گروه مهندسی مواد، پردیس فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

*مسئول مکاتبات: mosal@yazd.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۱۵)

چکیده: برای بهبود استحکام اتصال نقطه‌ای صفحات آلومینیومی از سنتز درجای آلومینیوم و کروم (Al/Cr) در موضع اتصال استفاده شد. بدین منظور مقدار ۰/۰۳ gr پودر Cr با اندازه ذرات ۱۰ μm به موضع اتصال نقطه‌ای آلومینیومی افزوده و تحت فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (FSSW) واقع شد. بررسی‌های ریزساختاری، تشکیل ترکیبات بین فلزی و خواص مکانیکی نمونه‌ها به ترتیب توسط میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی به همراه آنالیز خطی و نقطه‌ای EDS و آزمون‌های کشش و ریزسختی سنجی انجام شد. بررسی آنالیز شیمیایی نقطه‌ای و خطی موضع اتصال نشان داد که سرعت چرخشی لازم برای تشکیل ترکیبات بین فلزی Al و Cr حین FSSW، ۲۵۰۰ rpm می‌باشد که با تأمین حرارت لازم برای سنتز، موجب تشکیل ترکیبات بین فلزی (Al₁₃Cr₂) غنی از Al و Cr در موضع اتصال شد. مقدار سختی در مرکز اتصال برای نمونه بدون پودر Cr و نمونه تقویت شده با پودر Cr به ترتیب ۶۰±۵ HV و ۱۴۰±۵ HV و استحکام بیشینه برای این دو نمونه به ترتیب ۴۰±۵ MPa و ۱۳۰±۱۰ MPa حاصل شد که این افزایش سختی و استحکام مذکور ناشی از تشکیل رسوبات غنی از Al و Cr در موضع اتصال بود.

واژه‌های کلیدی:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، سنتز درجا، ترکیب بین فلزی، کروم، ریزسختی.

۱- مقدمه

در موضع اتصال می‌شود. گرم شدن موضعی، ماده‌ی اطراف پین را نرم و با حرکت چرخشی پیش‌رونده‌ی ابزار، ماده از جلو به عقب پین فشرده می‌شود. در این فرایند اتصال در حالت جامد ایجاد می‌شود [۱-۴]. بوتزی و همکاران [۵] اثر پارامترهای فرایند جوشکاری نقطه‌ای اصطکاکی اغتشاشی را بر روی خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۵۱۸۲ مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش سرعت چرخشی FSSW، اندازه دانه

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۱ یک فرایند اتصال‌دهی حالت جامد است که برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم استفاده می‌شود. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در سال ۱۹۹۱ میلادی توسط مؤسسه جوش انگلستان اختراع و در ادامه تکنیک جوشکاری نقطه‌ای اصطکاکی اغتشاشی^۲ توسط شرکت مزدا در سال ۲۰۰۴ توسعه یافت. در این روش ابزار چرخان غیر مصرفی با هندسه مشخص در موضع اتصال وارد و چرخش ابزار موجب ایجاد حرارت

خطی را طی می‌کند و در نهایت خارج می‌شود. مزیت اصلی این روش ایجاد یک خط اتصال بزرگتر است که باعث افزایش استحکام می‌شود [۸].

با توجه به اینکه روش‌های مذکور نیازمند تکنولوژی پیچیده، ابزارهای اضافه و هزینه‌های بالا هستند، به همین منظور ایده سنتز درجای یک فاز سخت در ناحیه جوش و ایجاد یک کامپوزیت زمینه فلزی در آن ناحیه، جهت افزایش استحکام ناحیه جوش در حین فرایند اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای پیشنهاد شد. در همین راستا شهسوار فرد و همکاران [۹] با اضافه کردن پودر نیکل و آلومینیوم و ایجاد سنتز درجا در منطقه جوش و تشکیل ذرات بین فلزی Al_3Ni در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای استحکام این ناحیه را افزایش دادند. نتایج آنالیز میکروسکوپ روبشی الکترونی آن‌ها نشان داد Al_3Ni تنها ذرات حاصل از سنتز پودر نیکل و آلومینیوم بود که پخش این ذرات به صورت یکنواخت در ناحیه جوش، باعث افزایش سختی و استحکام در این ناحیه شد. انوری و همکاران [۱۰] برای تهیه کامپوزیت چند لایه‌ای خود ابتدا پودر اکسید کروم را با استفاده فرایند پاشش پلاسمایی اتمسفری بر سطح ورق آلیاژ $Al6061$ پوشش داده و سپس با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی، شرایط مخلوط شدن پوشش و زیرلایه و انجام واکنش را فراهم نمودند. نکته قابل توجه در این پژوهش تشکیل $Al_{13}Cr_2$ به عنوان اولین ترکیب بین فلزی بود. آن‌ها همچنین افزایش ۱/۵ برابری سختی نمونه نانو کامپوزیت را ناشی از حضور همین ذرات دانستند.

نظر به مشکل باقی ماندن حفره در موضع اتصال جوش نقطه‌ای FSSW و هزینه‌های زیاد همراه با جوشکاری FSSW با قابلیت پر شده و سوییگ، در این تحقیق به منظور افزایش قابلیت تحمل بار در نقطه جوش‌های ایجاد شده توسط فرایند FSSW از کامپوزیت‌سازی درجای $Al-Cr$ به دلیل استفاده کمتر از کروم در تحقیقات گذشته، در موضع اتصال نقطه‌ای صفحات آلومینیومی استفاده شد.

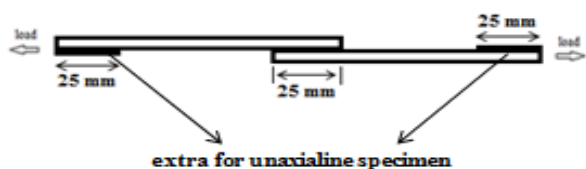
۲- مواد و روش انجام تحقیق

در منطقه اغتشاش ریزتر و وسعت این ناحیه بیشتر شده که باعث افزایش استحکام و سختی ناحیه جوش می‌شود. همچنین بررسی آن‌ها در مورد عمق نفوذ پین نیز نشان داد هرچه عمق نفوذ پین افزایش یابد، استحکام ناحیه اغتشاش یافته افزایش خواهد یافت.

بر اساس نتایج پژوهش مرزوق و همکاران [۶] افزایش سرعت چرخشی در حین فرایند FSSW در یک زمان مشخص علاوه بر ریزدانه کردن ناحیه اغتشاش و افزایش خواص مکانیکی باعث افزایش دمای ناحیه جوش می‌شود. با این حال مشکل اصلی روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بر جای ماندن حفره ناشی از پین است که باعث کاهش خواص مکانیکی اتصال می‌شود. برای برطرف کردن این مشکل، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای پرشونده^۳ به وسیله شرکت GKSS آلمان اختراع گردید. در این روش از سه قطعه شامل یک حلقه گیره، شانه خارجی و پین داخلی استفاده می‌شود. حلقه گیره به صورت ثابت در جای خود قرار دارد و از حرکت قطعه کار در طول فرایند اتصال‌دهی جلوگیری می‌کند. هنگامی که قطعه کاملاً گرم شد پین داخلی شروع به فرورفتن در سطح بین صفحه بالایی و پایینی می‌کند، در حالی که شانه خارجی برای ایجاد فضا جهت جمع شدن مواد خارج شده از محل اتصال مقداری بالا می‌رود. در مرحله آخر پین داخلی به سمت بالا حرکت کرده و شانه خارجی برای اکستروژن کردن مواد بیرون زده شده به سمت پایین می‌رود و در نهایت سطحی صاف و با کمترین زائده اضافی حاصل خواهد شد. با این که روش پرشونده یک ابتکار خلاقانه است اما شانه با قطر بزرگتر، مواد بیشتری را جابجا می‌کند و پین با قطر کوچکتر مجبور به برگرداندن آن‌ها می‌باشد؛ اما چون این امر امکان ندارد، مواد به دیواره اطراف پین و دیواره داخلی شانه چسبیده و به مرور افزایش پیدا می‌کند. این حالت باعث چسبیدن مداوم پین به داخل شانه و ایجاد مشکل در طول فرایند جوشکاری می‌شود [۷].

برای اصلاح این روش، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای سوییگ^۴ توسط شرکت Hitachi اختراع گردید. در روش جوشکاری سوییگ، ابزار پس از ورود به قطعه کار یک مسیر

میلی لیتر اتانول تحت ولتاژ ۲۵ ولت و زمان ۶۰ ثانیه مورد الکتروپولیش واقع شدند. در نهایت عملیات اچ توسط محلول کلر^۵ (۱۰ میلی لیتر HF، ۱۰ میلی لیتر HNO₃، ۳۰ میلی لیتر HCL، ۵۰ میلی لیتر H₂O) بر روی نمونه‌ها انجام شد. مطالعات ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری Olympus مدل PMG3 و میکروسکوپ الکترونی روبشی LEO1450VP مجهز به آنالیزگر EDS خطی و نقطه‌ای انجام گرفت. برای انجام آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM E384 نمونه‌هایی با ابعاد ذکر شده در شکل (۲) تهیه و با سرعت ۲mm/min توسط دستگاه Santam مدل STM-150 تحت آزمون کشش قرار گرفتند. همچنین مقادیر سختی در جهت عرضی (عمود بر مسیر فرایند) به کمک دستگاه ریزسختی سنجی ویکرز مدل Time Technology Europe HVS-100 اندازه‌گیری شد. بار اعمالی به نمونه ۱۰۰ gr، مدت زمان اعمال بار ۱۰ ثانیه و فواصل بین نقاط اندازه‌گیری ۱ میلی متر در نظر گرفته شد.



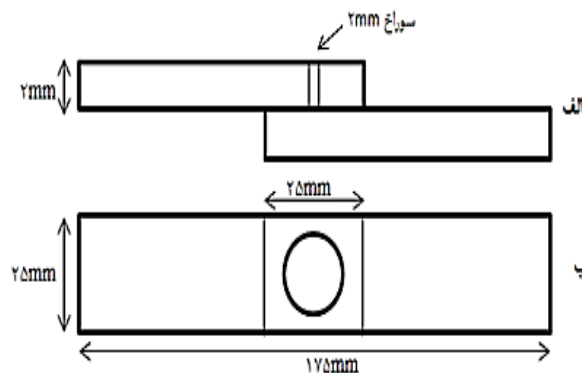
شکل (۲): ابعاد نمونه جهت انجام آزمون کشش

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریزساختار

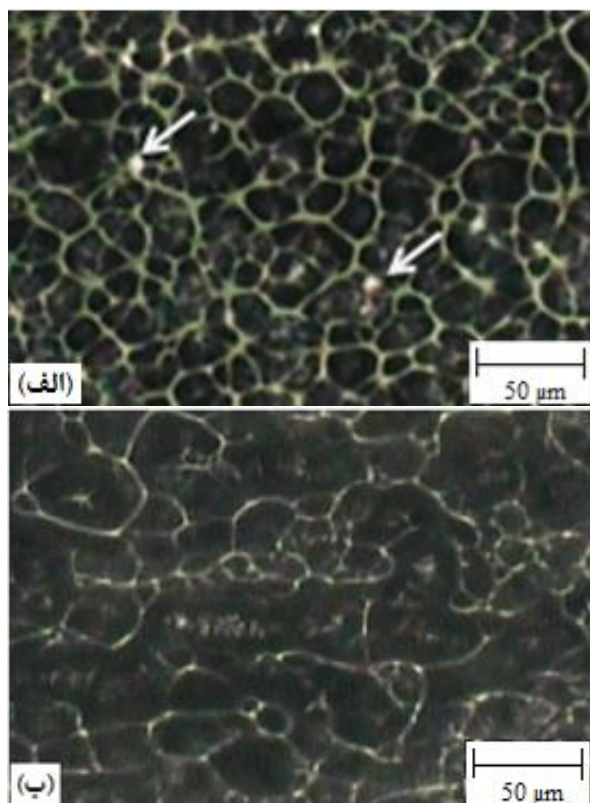
ریزساختار نوری از ناحیه FSSW شده در دو وضعیت بدون و همراه با پودر کروم در شکل (۳) ارائه شده است.

در تحقیق حاضر از ورق‌های آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰ با ضخامت ۲ mm و ترکیب شیمیایی اسمی (Al-0.04%Fe-0.08%Cr(wt%)) به عنوان زمینه استفاده شد. پودر کروم با اندازه متوسط ذرات $10 \mu\text{m} \leq$ به عنوان ذرات ایجاد کننده ترکیبات بین فلزی جهت افزایش استحکام و سختی موضع اتصال انتخاب گردید. جهت آماده سازی نمونه‌های مورد استفاده در فرایند اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، ورق آلومینیوم به ابعاد $25 \times 100 \text{ mm}$ برش زده و در برخی صفحات سوراخی با قطر ۲ mm در سرتاسر ضخامت به منظور واقع شدن پودر کروم ایجاد شد. تمیزکاری سطحی بلافاصله قبل از جو شکاری انجام شد و صفحات مطابق شکل (۱) مونتاژ شدند.



شکل (۱): شماتیک طرح اتصال: (الف): نمای روبرو و (ب): نمای فوقانی

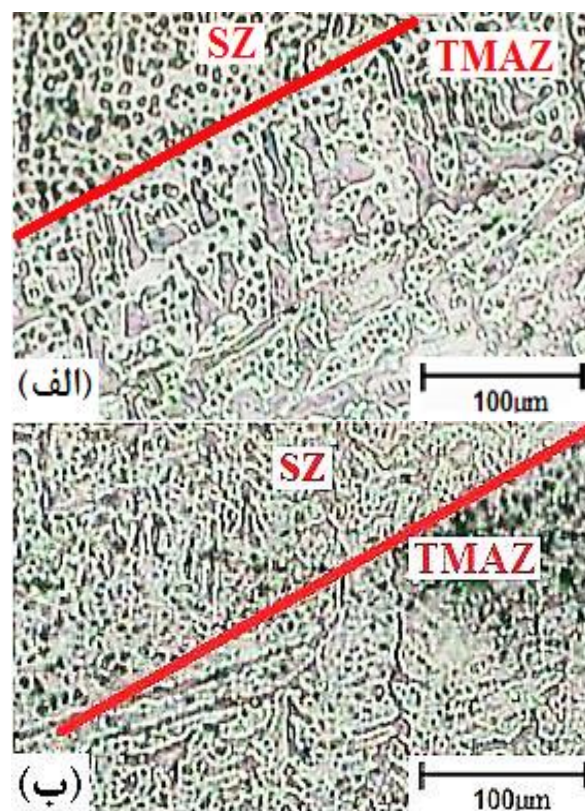
انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (FSSW) توسط دستگاه فرز اونیورسال و با استفاده از ابزار با ابعاد قطر شانه ۱۸ mm متشکل از پینی مخروط ناقص با قطر کوچک، قطر بزرگ و ارتفاع به ترتیب ۴ mm، ۶ mm و ۲/۵ mm انجام شد. FSSW در سرعت‌های متفاوت ۱۶۰۰، ۱۲۵۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ دور بر دقیقه و مدت ۵ ثانیه پس از تماس شدن شانه ابزار (فروروی ابزار به اندازه ۲/۵ mm) با صفحه آلومینیوم انجام گرفت. نمونه‌های انتخاب شده جهت بررسی ریزساختاری از مقطع عرضی موضع اتصال برش و مانت شد، پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها مطابق با شرایط استاندارد متالوگرافی در محلول شامل ۱۰ میلی لیتر اسید پرکلریک و ۹۰



شکل (۴): تصاویر میکروسکوپ نوری از دانه بندی و رسوبات تشکیل شده در ناحیه SZ: (الف): نمونه همراه با پودر کروم (فلش نشان دهنده رسوبات سفید رنگ است) و (ب): نمونه بدون پودر کروم

همچنین مطالعات میکروسکوپی نوری با بزرگنمایی بالاتر، در نمونه همراه با پودر کروم حضور رسوبات سفید رنگ در موضع اتصال FSSW را نشان داد (شکل ۴- الف). بررسی SEM در مد الکترون برگشتی این رسوبات در شکل (۵) ارائه شده است. از آنجایی که تعداد الکترون‌های برگشتی از یک فاز، متناسب با عدد جرمی آن فاز می‌باشد کنتراست رنگی موجود در تصویر SEM-BSE را می‌توان به تشکیل فازهای مختلف نسبت داد [۱۴].

تغییر رنگ نواحی مختلف در تصاویر SEM، بر پایه الکترون‌های برگشتی (شکل ۵) را می‌توان به تغییر ترکیب شیمیایی نسبت داد. عبارت دیگر رنگ روشن‌تر نواحی مرکزی رسوبات را می‌توان به تجمع بیشتر کروم با جرمی $51/996 \text{ gr/mol}$ و نواحی تیره رنگ زمینه را می‌توان به غنی بودن زمینه از عنصر آلومینیوم با عدد جرمی 26982 gr/mol نسبت داد.

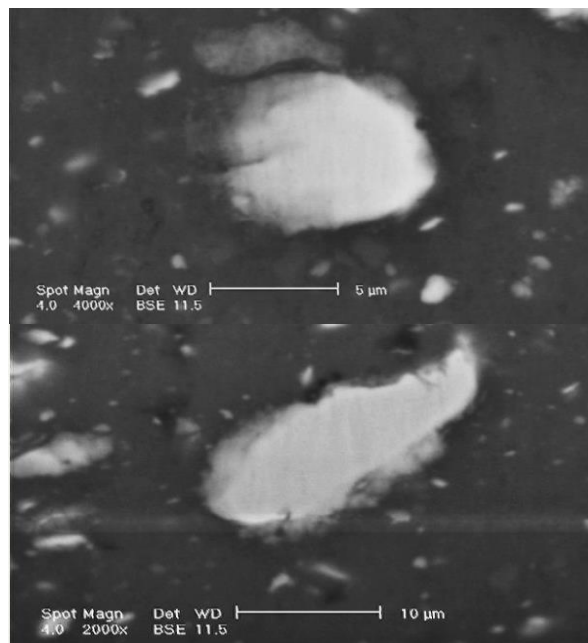


شکل (۳): تصویر میکروسکوپ نوری از موضع اتصال FSSW شده: (الف): نمونه همراه با پودر کروم و (ب): نمونه بدون پودر کروم

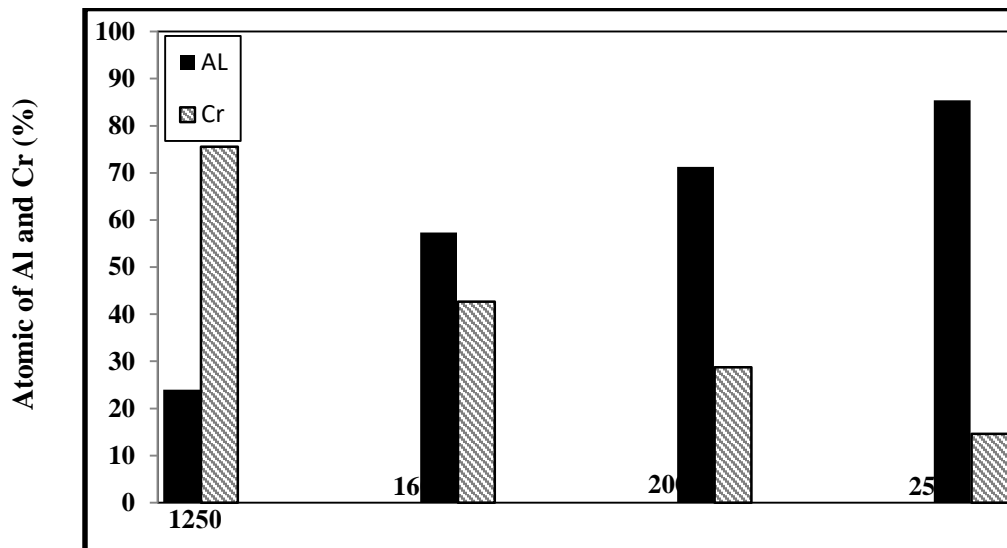
تغییر شکل پلاستیکی شدید همراه با دمای بالای ایجاد شده در اثر اغتشاش حاصل از حرکت چرخشی پین و تماس شانه ابزار در ناحیه اغتشاش (SZ)، باعث ایجاد تبلور مجدد دینامیکی در این ناحیه شده [۱۱] و ساختار ریزتری نسبت به ناحیه ترمومکانیکال (TMAZ) تشکیل می‌شود. همچنین TMAZ مربوط به هر دو نمونه تفاوت چندانی مشاهده نمی‌شود که به دلیل تغییر شکل پلاستیکی کمتر این ناحیه و عدم تأثیر پودر Cr بر آن می‌باشد [۱۲-۱۱].

در شکل (۴) تأثیر استفاده از کروم بر دانه بندی منطقه FSSW شده نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود اندازه دانه SZ در نمونه بدون پودر کروم و همراه با پودر کروم به ترتیب در حدود $20 \pm 5 \mu\text{m}$ و $10 \pm 3 \mu\text{m}$ می‌باشد. در نمونه همراه با پودر کروم، تشکیل رسوبات در SZ منجر به قفل شدن مرز دانه‌ها و تجمع نایبایی‌ها شده که به عنوان مراکز جوانه‌زنی در تبلور مجدد و تشکیل دانه‌های ظریف‌تر می‌شود [۱۳].

همچنین نواحی خاکستری رنگ در مرز رسوبات را می‌توان به حضور همزمان کروم و آلومینیوم (تشکیل ترکیبات بین‌فلزی مربوطه) نسبت داد. نکته قابل توجه، تشکیل رسوبات ریز با کنتراست رنگی مشابه با نواحی اطراف رسوبات درشت در زمینه FSSW شده بود. مطابق با پژوهش انوری و همکاران [۱۰] اولین ترکیب بین‌فلزی تشکیل شده در سیستم دوتایی آلومینیوم و کروم، $Al_{13}Cr_2$ می‌باشد. در شکل (۶) نتایج حاصل از آنالیز EDS رسوبات تشکیل شده در موضع FSSW بر حسب سرعت چرخش ابزار ارائه شده است. همان گونه که در این شکل نشان داده شده است با افزایش سرعت چرخش ابزار، نسبت آلومینیوم به کروم در رسوبات مذکور افزایش یافته و در سرعت چرخشی rpm ۲۵۰۰ نسبت آلومینیوم به کروم به حدود ۶ برابر رسیده است که دلالت بر واکنش بین آلومینیوم و کروم دارد. بنابراین در ادامه سرعت ۲۵۰۰ rpm برای انجام FSSW انتخاب و مطالعات بر روی نمونه‌های آزمایش شده با این سرعت انجام شد.



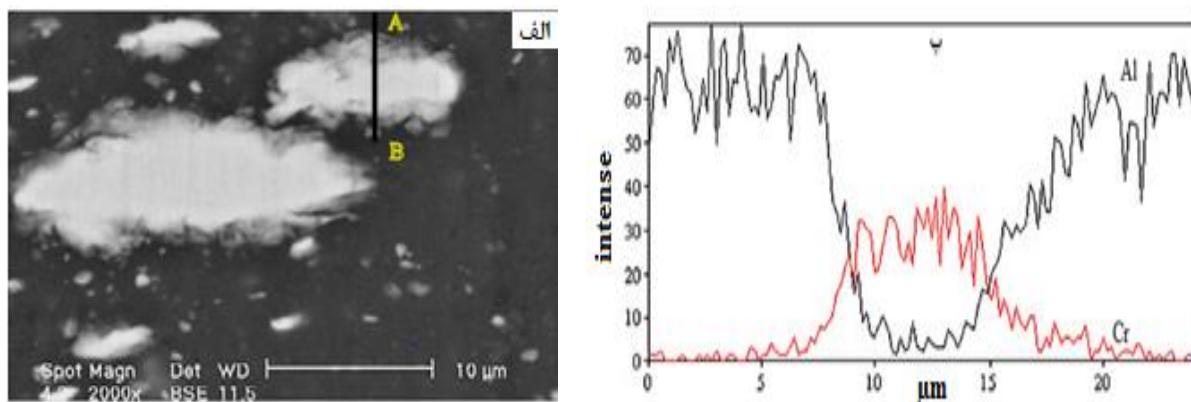
شکل (۵): تصویر میکروسکوپی توسط الکترون‌های برگشتی میکروسکوپ الکترونی روبشی از رسوبات درشت حاصل از پودر کروم در زمینه آلومینیوم



شکل (۶): آنالیز EDS اولیه از مقدار درصد آلومینیوم و کروم در ناحیه خاکستری رنگ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای سرعت‌های چرخشی ۱۲۵۰، ۱۶۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ دور بر دقیقه

کاهش یافته و در مقابل مقدار کروم افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه حضور مقادیر قابل ملاحظه Al و Cr در فاصله حدود ۲-۴ μm از کناره رسوبات می‌باشد.

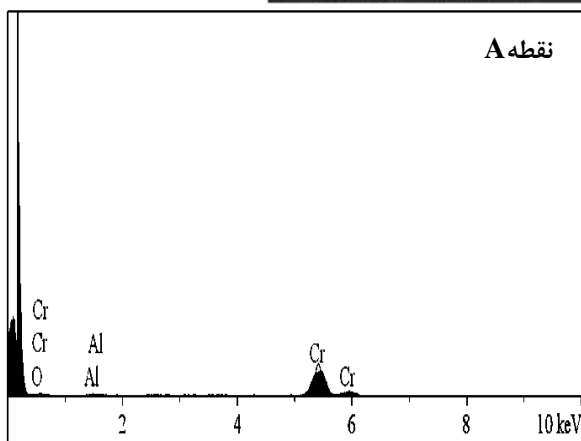
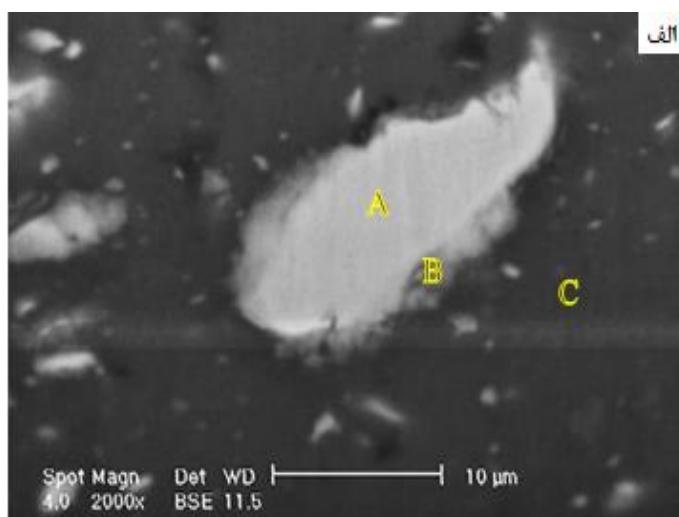
آنالیز خطی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بر روی یکی از رسوبات تشکیل شده در SZ همراه با نواحی اطراف در شکل (۷) ارائه شده است. همان گونه که از این شکل برداشت می‌شود با حرکت از کناره‌های رسوب به سمت مرکزی رسوب، مقدار Al



شکل (۷): (الف): مسیر آنالیز Line-EDS و (ب): آنالیز خطی میکروسکوپ الکترونی رویشی از مقطع عرضی ذره آگلمره

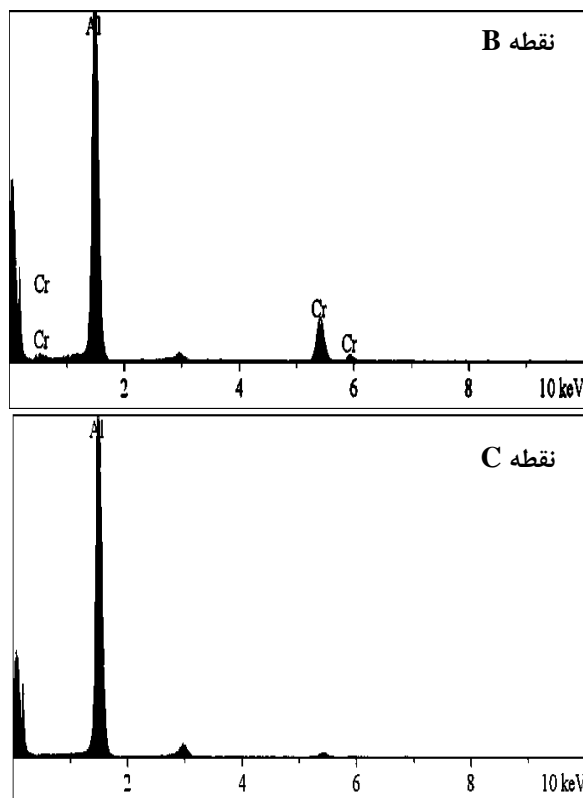
شکل (۸) برداشت می‌شود، مرکز رسوبات Cr ۹۹wt%، کناره‌های رسوبات دارای ترکیب بین فلزی در حدود Cr ۱۴ wt% و فاز زمینه دارای Al ۹۸ wt% است (شکل ۸-ب).

در شکل (۸) آنالیز Spot-EDS از نقاط مختلف رسوب در زمینه FSSW نشان داده شده است. در آنالیز نقطه‌ای نتایج مشابه با آنالیز خطی حاصل گردید. همان گونه که از قسمت‌های مختلف



ب

| Elt. | Line | Intensity (c/s) | Atomic % | Conc | Units |
|------|------|-----------------|----------|--------|-------|
| Al | Ka | 16.06 | 0.84 | 3.55 | wt.% |
| Cr | Ka | 362.38 | 99.16 | 96.28 | wt.% |
| | | | 100.00 | 100.00 | wt.% |



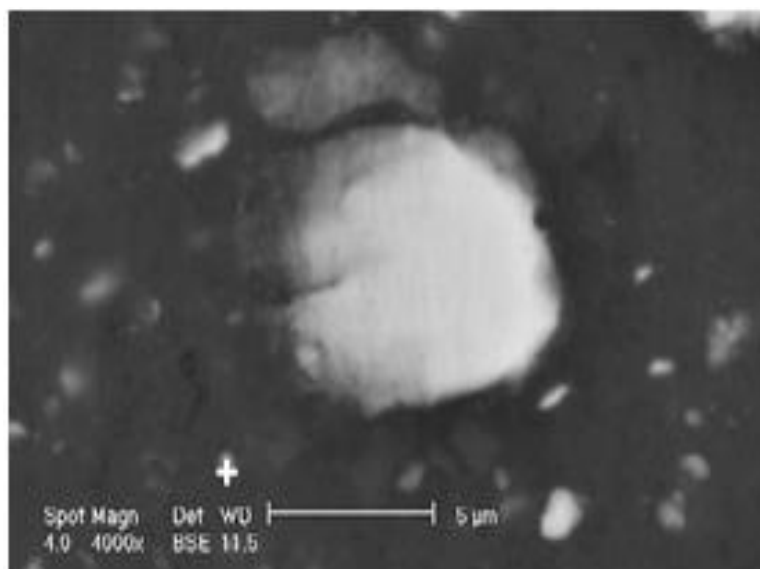
| Elt. | Line | Intensity (c/s) | Atomic % | Conc | Units |
|------|------|-----------------|----------|--------|-------|
| Al | Ka | 2,710.95 | 85.65 | 75.10 | wt.% |
| Cr | Ka | 449.42 | 14.35 | 24.90 | wt.% |
| | | | 100.00 | 100.00 | wt.% |

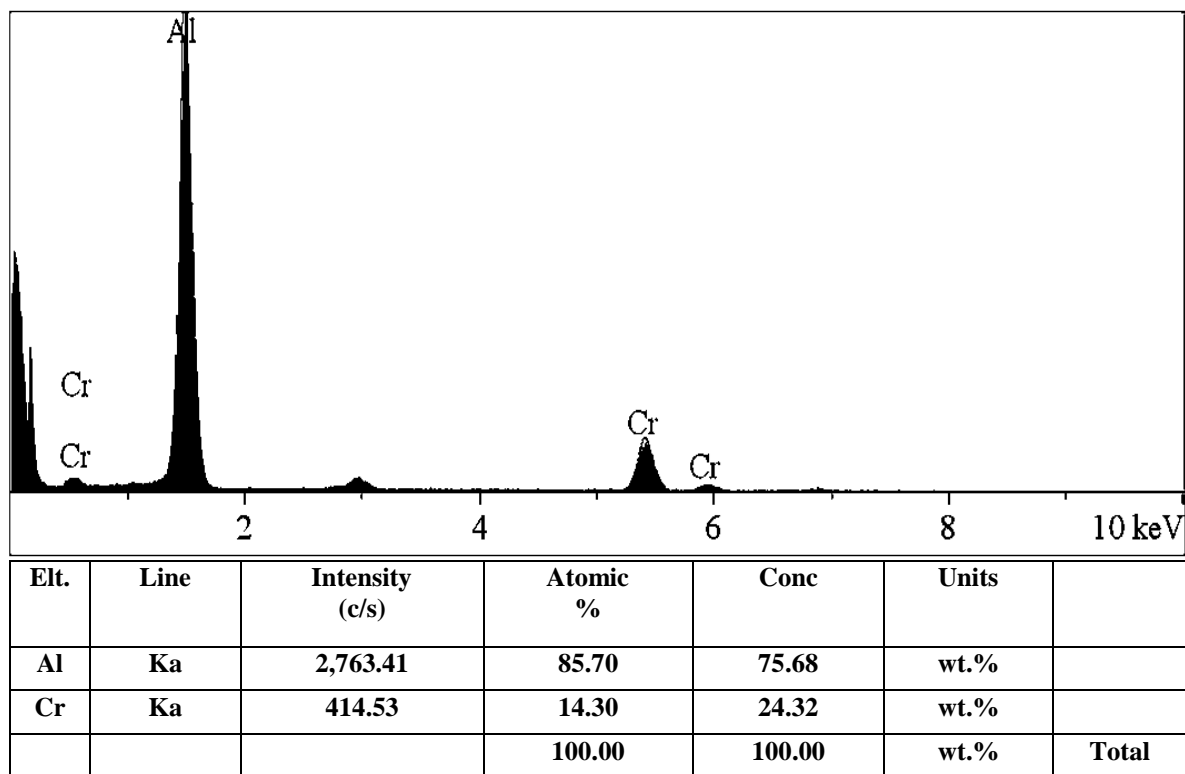
| Elt. | Line | Intensity (c/s) | Atomic % | Conc | Units |
|------|------|-----------------|----------|--------|-------|
| Al | Ka | 4,254.79 | 97.86 | 94.12 | wt.% |
| Cr | Ka | 100.72 | 2.14 | 5.88 | wt.% |
| | | | 100.00 | 100.00 | wt.% |

شکل (۸): آنالیز Spot-EDS از رسوبات تشکیل شده در SZ همراه با پودر Cr: (الف): نقاط بررسی شده توسط آنالیز نقطه‌ای میکروسکوپ الکترونی روبشی در زمینه FSSW و (ب): نتایج آنالیز Spot-EDS مربوط به نقاط A، B و C

۸۵/۷۰ wt% Al و ۱۴/۳۰ Cr مشابه با نواحی خاکستری رنگ اطراف رسوبات درشت هستند.

همچنین آنالیز Spot-EDS بر روی رسوبات ریز و پراکنده موجود در اطراف رسوبات درشت انجام گرفت که در شکل (۹) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود این ذرات با wt%





شکل (۹): آنالیز Spot-EDS از رسوبات ریز و پراکنده تشکیل شده در موضع FSSW شده همراه با پودر Cr

که ΔH^0 گرمای تشکیل، $\Delta H'$ گرمای مؤثر تشکیل، C_e غلظت مؤثر و C_i غلظت ترکیب مورد نظر است. پریترئوس نشان داد اولین ترکیب شکل گرفته در طول واکنش فلز- فلز، فازی با منفی ترین گرمای مؤثر تشکیل در پایین ترین دمای یوتکتیک می باشد. با این وجود در حین واکنش حالت جامد در فصل مشترک، تشکیل فاز جامد یک پروسه غیر تعادلی است و برخلاف سیستم های تعادلی که شکل گیری چندین فاز به طور همزمان سیستم را به پایین ترین سطح انرژی می رساند، تنها یک فاز در فصل مشترک به وجود می آید. بنابراین منطقی تر است تا تغییر انرژی آزاد مؤثر تشکیل (ΔG_i^e) با گرمای مؤثر تشکیل جایگزین گردد.

رابطه (۲) تغییر انرژی آزاد مؤثر تشکیل برای فاز i در واکنش فصل مشترک Al-Cr را نشان می دهد.

$$\Delta G_i^e = \Delta G_i \times \left(\frac{C_e}{C_i}\right) \quad (2)$$

۲-۳- ترمودینامیک واکنش بین Al-Cr و تشکیل ترکیب بین فلزی $Al_{13}Cr_2$

پریترئوس و همکاران [۱۴] گرمای مؤثر تشکیل را برای پیش بینی تشکیل اولین فاز در سیستم های دوگانه پیشنهاد نمودند. با توجه به اینکه غلظت واقعی در طول واکنش حالت جامد قابل محاسبه نیست، این پارامتر را می توان از طریق یک ضریب فعال سازی به غلظت مؤثر ارتباط داد. با توجه به این مطلب که بیشترین حرکت اتم ها، بیشترین نفوذ و بیشترین اختلاط مؤثر عناصر در پایین ترین دمای یوتکتیک رخ می دهد، لذا می توان بر اساس غلظت مؤثر (غلظت در پایین ترین دمای یوتکتیک) گرمای مؤثر تشکیل برای شکل گیری ترکیبات مختلف در یک سیستم دوتایی محاسبه نمود.

$$\Delta H' = \Delta H^0 * \left(\frac{\text{effective conc. lim. element } (c_e)}{\text{comound conc. lim. element } (c_l)}\right) \quad (1)$$

$$\Delta G^{\circ} = -4.09 \times \left(\frac{0.020}{0.125} \right) = -0.6544 \frac{kJ}{mol}$$

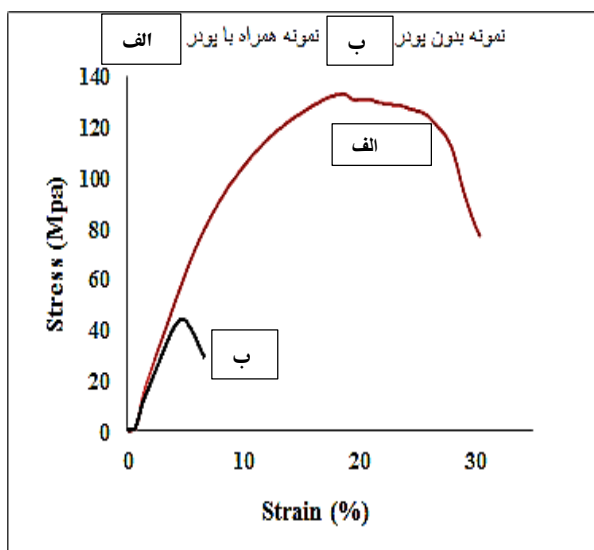
در جدول (۱) تغییرات انرژی آزاد مؤثر تشکیل برای تمام ترکیبات آلومینیوم در غلظت $Al_{0.980}Cr_{0.020}$ (غلظت در پایین ترین دمای یوتکتیک) و دمای $400^{\circ}C$ ارائه شده است. در غلظت مؤثر $Al_{0.980}Cr_{0.020}$ با توجه به منفی ترین تغییرات انرژی آزاد مؤثر تشکیل ($\Delta G^{\circ} = -0.6544 \text{ kJ/mol}$) برای $Al_{13}Cr_2$ ، انتظار می‌رود تا این ترکیب، اولین ترکیب بین فلزی تشکیل شده در فصل مشترک باشد، که با توجه به نتایج این انتظار برآورده شده است.

که ΔG_i تغییرات انرژی آزاد تشکیل برای فاز i ، غلظت مؤثر عنصر محدودکننده در فصل مشترک و C_i غلظت مؤثر عنصر محدودکننده در ترکیب می‌باشد [۱۴-۱۶].

در این پژوهش با استفاده از یک ترموکوپل که به کمک یک سیم مسی در زیر مرکز جوش متصل شده بود، دمای فرایند FSSW محاسبه شد. بر اساس حداکثر دمای ایجاد شده حین FSSW که در این پژوهش حدود $400^{\circ}C$ اندازه‌گیری شد، مطابق با رابطه (۲) برای تغییرات انرژی آزاد مؤثر تشکیل $Al_{13}Cr_2$ در دمای $400^{\circ}C$ رابطه‌ی ذیل وجود دارد.

جدول (۱): انرژی آزاد مؤثر تشکیل برای ترکیبات Al-Cr در غلظت مؤثر $Al_{0.980}Cr_{0.020}$ در دمای $400^{\circ}C$

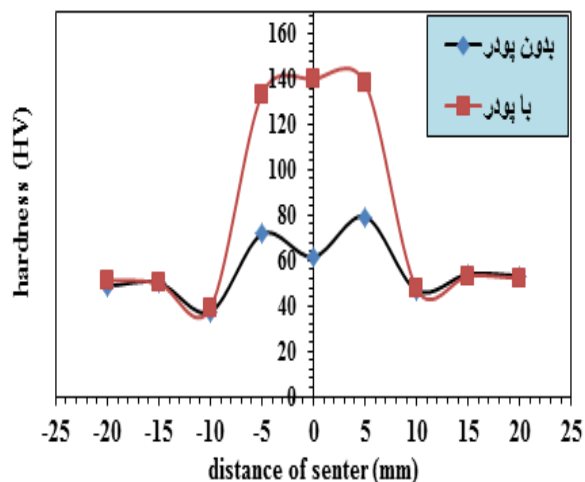
| فاز | عنصر محدود کننده | ΔG_i (kJ/mol) | ΔG_i° (kJ/mol) |
|--|------------------|-----------------------|-------------------------------|
| $AlCr_2$ ($Al_{0.333}Cr_{0.667}$) | Cr | -۹/۰۱ | -۰/۲۷۰۱ |
| Al_8Cr_5 ($Al_{0.615}Cr_{0.385}$) | Cr | -۹/۲ | -۰/۴۷۷۹ |
| Al_9Cr_4 ($Al_{0.698}Cr_{0.308}$) | Cr | -۸/۱۹ | -۰/۵۳۱۸ |
| Al_4Cr ($Al_{0.800}Cr_{0.200}$) | Cr | -۶/۰۵ | -۰/۶۰۵ |
| $Al_{11}Cr_2$ ($Al_{0.836}Cr_{0.164}$) | Cr | -۴/۹ | -۰/۵۹۷۵ |
| $Al_{13}Cr_2$ ($Al_{0.875}Cr_{0.125}$) | Cr | -۴/۰۹ | -۰/۶۵۴۴ |



شکل (۱۰): نمودار تنش- کرنش مربوط موضع اتصال FSSW شده

۳-۳- خواص مکانیکی نمونه‌های FSSW شده

تأثیر استفاده از پودر کروم بر قابلیت تحمل نیرو توسط نقطه جوش های ایجاد شده در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان گونه که از این شکل برداشت می‌شود استفاده از پودر کروم در حدود ۳۰٪ موجب بهبود قابلیت تحمل بار توسط نمونه‌ها شده است. این بهبود استحکام را می‌توان به تشکیل رسوبات غنی از Al و Cr از قبیل $Al_{13}Cr_2$ در موضع اتصال دانست. انوری و همکاران گزارش نمودند که رسوبات مذکور با ایجاد مانع بر سر راه نابجایی‌ها موجب افزایش استحکام می‌شوند [۱۰].



شکل (۱۲): نمودار میکرو سختی نمونه‌های ۱- بدون اضافه کردن پودر کروم
۲- با اضافه کردن پودر کروم

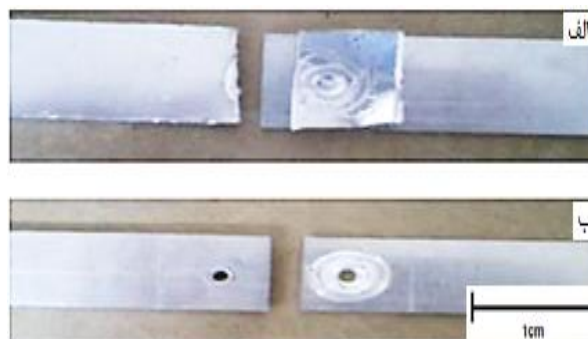
۴- نتیجه گیری

در این پژوهش بهبود قابلیت تحمل بار اتصال نقطه‌ای صفحات آلومینیومی توسط سنتز درجای آلومینیوم و کروم (Al/Cr) در موضع اتصال FSSW بررسی شد. بر اساس نتایج حاصله، موارد زیر را می‌توان به عنوان یافته‌های این پژوهش گزارش نمود: ۱- تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه FSSW شده با پودر کروم و نمونه FSSW شده بدون پودر کروم نشان داد که حضور ذرات کروم موجب کاهش اندازه دانه از $20 \pm 5 \mu\text{m}$ به $10 \pm 3 \mu\text{m}$ در ناحیه اغتشاشی می‌شود.

۲- آنالیز نقطه‌ای و خطی میکروسکوپ الکترونی روبشی بر روی رسوبات نشان داد که مرکز رسوبات غنی از عنصر کروم و زمینه غنی از عنصر آلومینیوم است. همچنین آنالیز انجام شده در کنار این رسوبات حضور ترکیب بین فلزی با حدود ۱۴ درصد کروم که احتمالاً $\text{Al}_{13}\text{Cr}_2$ باشد را تأیید می‌کند.

۳- نتایج میکروسختی نشان می‌دهد که سختی نمونه FSSW تقویت شده با پودر کروم معادل با $140 \pm 5 \text{HV}$ و در حدود ۲/۵ برابر نسبت به سختی نمونه FSSW شده بدون پودر کروم (HV) 60 ± 5 بدست آمد. ریزشدن دانه‌ها و همچنین حضور رسوبات بین فلزی غنی از Al و Cr در نمونه همراه با پودر کروم باعث افزایش سختی می‌شود.

در شکل (۱۱) مورفولوژی نمونه‌ها بعد از شکست در آزمون کشش نشان داده شده است.



شکل (۱۱): تصویر مورفولوژی بعد از شکست در آزمون کشش: (الف):
نمونه FSSW شده با پودر کروم و (ب): نمونه FSSW شده بدون پودر کروم

بر این اساس می‌توان استنباط نمود که سنتز درجای آلومینیوم و کروم در موضع اتصال FSSW موجب ایجاد مد شکست کندگی در نمونه‌ها شده و پارگی نواحی اطراف نقطه جوش موجب شکست شده است. در حالیکه نمونه‌های FSSW شده بدون ذرات کروم تقریباً در مد برش از موضع اتصال شکسته شده‌اند.

در شکل (۱۲) تأثیر استفاده از پودر کروم بر توزیع سختی دو نمونه ارائه شده است. سختی برای نمونه‌ی FSSW شده همراه با پودر کروم و نمونه‌ی بدون پودر کروم در مرکز اتصال به ترتیب HV 5 ± 140 و 5 ± 60 حاصل شد که این افزایش سختی ناشی از حضور رسوبات بین فلزی $\text{Al}_{13}\text{Cr}_2$ در زمینه آلومینیوم و همچنین ریزشدن دانه‌ها در SZ است. همچنین مشاهده می‌شود که با دور شدن از مرکز اتصال، سختی برای هر دو نمونه کاهش یافته تا اینکه به مقدار یکسانی برای هر دو رسیده است. زیرا با دور شدن از مرکز اتصال، مقدار ترکیبات بین فلزی کمتر شده و همچنین با درشت شدن ساختار، سختی کاهش یافته تا نهایتاً در فلز پایه مقدار یکسانی برای سختی در هر دو نمونه مشاهده می‌شود.

- [8] C. D. Allen & J. A. Arbegast, "Evaluation of Friction Spot Welding in Aluminium Alloys", Paper 2005-01-1252, 2005 SAE World Congress (Detroit, MI), Society of Automotive Engineerings, 2005.
- [9] Sh. Shahsavari fard, J. Vahdati Khaki & M. Haddad Sabzevar, "Increasing the strength of the weld zones by in situ synthesis of hard phases of Al-Ni binary system during the FSSW process", Iran International Aluminum Conference (IIAC2014) Tehran, I.R. Iran, May 25-26, 2014.
- [10] S. R. Anvari, F. Karimzadeh & M. H. Enayati, "A novel route for development of Al-Cr-O surface nano-composite by friction stir processing", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 562, pp. 48-55, 2013.
- [11] R. S. Mishra & M. W. Mahoney, "Friction stir processing: A new grain refinement technique to achieve high strain rate super plasticity in commercial alloys", Mater. Sci. Forum, Vol. 357-359, pp. 507-512, 2001.
- [12] A. R. Shirani Bidabadi, M. H. Enayati, E. Dastanpoor, R. A. Varin & M. Biglari, "Nanocrystalline intermetallic compounds in the Al-Cr system synthesized by mechanical alloying and their thermodynamic analysis", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 581, pp. 91-100, 2013.
- [13] M. Dunlap & J. E. Adaskaveg, "Introduction to the scanning electron microscope, theory, practice & procedures", Facility for Advanced Instrumentation, U. C. Davis, 1997.
- [14] R. Pretorius, T. K. Marias & C. C. Theron, "Thin film compound phase formation sequence: An effective heat of formation model", Materials Science Engineering, Vol. 10, pp. 1-83, 1993.
- [15] R. S. Mishra & Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing", Materials Science and Engineering R, Vol. 50, pp. 1-78, 2005.
- [16] Li & X. Zhang, "Thermodynamic analysis of the simple microstructure of Al Cr Fe Ni Cu high-entropy alloy with multi-principal elements", Acta Metall. Sin (Engl. Lett.), Vol. 22 No. 3, pp. 219-224, 2009.
- ۴- آزمون استحکام بر روی نمونه FSSW شده همراه با اضافه کردن پودر کروم و نمونه FSSW شده بدون پودر کروم به ترتیب استحکامی در حدود 130 ± 10 MPa و 40 ± 5 MPa را نشان می‌دهد که این افزایش استحکام (حدود ۳۰٪) را می‌توان مرتبط با تشکیل رسوبات غنی از Al و Cr از قبیل $Al_{13}Cr_2$ در موضع اتصال دانست.
- ### ۵- مراجع
- [1] Ozdemir, S. Ahrens, S. Mucklich & B. Wielage, "Nanocrystalline Al-Al₂O₃p and SiCp composites produced by high-energy ball milling", J. Mater. Process. Technol, Vol. 205, pp. 111-118, 2008.
- [۲] ک. امینی، ف. غروی، ا. پرجمی، م. امیرخانی و ح. قاسمی، "بررسی رفتار خوردگی مقطع جوشکاری شده آلیاژ آلومینیوم به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال هشتم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۳.
- [3] Q. Zhang, B. L. Xiao & Z. Y. Ma, "In situ formation of various intermetallic particles in AlTiX (Cu, Mg) systems during friction stir processing", Intermetallic, Vol. 40, pp. 36-44, 2013.
- [۴] م. صادقی گوغری، م. کثیری و ک. امینی، "بررسی نسبت سرعت دوران به پیشروی ابزار در جوشکاری هم‌زن اصطکاکی اتصال غیر هم جنس آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به تیتانیوم خالص تجاری"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال نهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۴.
- [5] A. L. Bozzi, T. Baudin, V. Klosek, J. G. Kerbiguet & B. Criqui, "Influence of FSSW parameters on fracture mechanisms of 5182 aluminum welds", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 210, pp. 1429-1435, 2010.
- [6] M. Merzoug, M. Mazari, L. Berrahal & A. Imad, "Parametric studies of the process of friction spot stir welding of aluminum 6060-T5 alloys", Materials and Design, Vol. 31, pp. 3023-3028, 2010.
- [7] M. D. Tier, T. S. Rosendo, J. F. dos Santosb, N. Huber, J. A. Mazzaferro, C. P. Mazzaferro & T. R. Strohaecker, "The influence of refill FSSW parameters on the microstructure and shear strength of 5042 aluminium welds", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 213, pp. 997-1005, 2013.

[۱۷] ا. عبدالله زاده، ع. شکوه‌فر، ح. امیدوار، م. صفرخانیان و م. نادری، "بررسی تاثیر افزودن نانوذرات کاربید سیلیسیم بر خواص مکانیکی آلیاژ منیزیم AZ31 جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال دهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۵.

۶- پی نوشت

- [1] Friction Stir Welding (FSW)
- [2] Friction Stir Spot Welding (FSSW)
- [3] Refill FSSW
- [4] Swing FSSW
- [5] Keller

Improvement of load bearing capacity of Al-1100 joining area by using In-situ synthesizing of Al/Cr during FSSW

Saeed Motalebi^{1,*}, Masoud Mosallae², Ali Reza Mashreghi², Seyed Sadegh Ghasemi²

1- M.Sc. Student, Material Engineering group, Yazd University, Yazd, Iran

2- Associate Professor, Material Engineering group, Yazd University, Yazd, Iran

*Corresponding Author: Smotallebi69@yahoo.com

Abstract

In-situ synthesizing of Al/Cr was carried out to improve the strength of spot joining of Al plates. For this purpose, 0.03gr Cr powder with 10 μm particle size was inserted in the spot joining zone and the assembly was subjected to the Friction Stir Spot Welding Process (FSSW). Microstructure, formation of intermetallic compounds and mechanical properties of samples were investigated by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy with spot and line EDS, tensile and microhardness measurements. Spot and line scan chemical analysis (Spot-EDS and Line-EDS) of joining area indicated that minimal tool rotation speed for formation of Al-Cr intermetallic compounds ($\text{Al}_{13}\text{Cr}_2$) was around 2500 rpm. Formation of Al-Cr rich intermetallic compounds in the joining area increased the hardness of joining zone more than two times of hardness of join without this components (140 ± 5 HV and 60 ± 5 HV respectively). Furthermore, in-situ synthesis joining increased ultimate tensile strength of the joint from 40 ± 5 MPa to 130 ± 10 MPa.

Keywords: FSSW, In Situ Synthesis, Intermetallic Compound, Cr, Microhardness.

Journal homepage: ma.iaumajlesi.ac.ir

Please cite this article using:

Saeed Motalebi, Masoud Mosallae, Ali Reza Mashreghi, Seyed Sadegh Ghasemi, Improvement of load bearing capacity of Al-1100 joining area by using In-situ synthesizing of Al/Cr during FSSW, in Persian, New Process in Material Engineering, 2019, 13(4), 57-69.