

بررسی تأثیر جهت دوران و زمان توقف در جوشکاری اصطکاکی اختلاطی نقطه‌ای (FSSW) بر هندسه و استحکام نقطه جوش ورق‌های آلومینیم 2024-T3

امین مکی^۱، محمد علی صفرخانیان^{۲*}، شهرام خیراندیش^۳، مسعود گودرزی^۳
۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
۲- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی، گروه مواد، اصفهان، ایران
۳- عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
* M.A.Safarkhanian@gmail.com
(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۲/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۳/۰۲)

چکیده

برای اتصال نقطه‌ای لبه روی هم ورق‌های آلایژ آلومینیم 2024-T3 از فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی نقطه‌ای (FSSW) استفاده شد. در این تحقیق اثر جهت چرخش ابزار و زمان توقف بر استحکام برشی اتصال و هندسه‌ی منطقه‌ی اختلاط بررسی شده است. فصل مشترک اتصال و عرض منطقه‌ی اختلاط با استفاده از میکروسکوپ نوری بررسی شد و مشخص شد که با تغییر جهت دوران ابزار، فصل مشترک دو ورق نزدیک لبه‌ی پین یا هوک (Hook) تغییر شکل و تغییر جهت می‌یابد. همچنین با افزایش زمان توقف ابزار، عرض منطقه‌ی اختلاط و نیروی شکست آزمون برش افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی:

جوشکاری اصطکاکی اختلاطی نقطه‌ای، آلومینیم 2024-T3، جهت دوران ابزار، زمان توقف ابزار.

مقدمه

که معمولاً برای اتصال ورق‌های فولادی استفاده می‌شود، برای ورق‌های آلومینیومی جوش‌های بسیار ضعیفی از لحاظ خواص مکانیکی تولید می‌کند [۱-۲]. فرآیند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی^۲ (FSW) در سال ۱۹۹۱ توسط مؤسسه‌ی جوشکاری TWI^۳ ثبت اختراع شده است. به تازگی با تغییراتی در روش جوشکاری اصطکاکی اختلاطی، روشی به نام جوشکاری اصطکاکی اختلاطی نقطه‌ای^۴ (FSSW) توسعه و کاربرد پیدا

آلایژ آلومینیوم 2024 به دلیل ماهیت رسوب سختی‌پذیری آن و مستعد بودن به ترک گرم در حین جوشکاری ذوبی، به آلایژ جوش ناپذیر معروف شده است. ذوب شدن فازهای ثانویه و قرار گرفتن آنها در طول مرزدهانه‌های منطقه‌ی ذوب جزئی آلایژهای آلومینیم، باعث ترک بین دانه‌ای در کرنش‌های وارد شده حین جوشکاری می‌شود. به همین دلیل جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای^۱

سوراخ یا هوک^۵ و در نتیجه بر خواص مکانیکی اتصال تأثیر بسیار زیادی دارد. هدف انجام این پژوهش بررسی اتصال لبه روی هم (Lap-joint) ورق‌های آلومینیم 2024-T3 به ضخامت ۳ mm، با دو جهت دوران ابزار هم‌جهت و غیر هم‌جهت با شیار پین، در زمان‌های توقف ۰/۳ تا ۱۲ ثانیه و در سرعت دورانی ابزار ۴۵۰ RPM می‌باشد.

۲- روش تحقیق

برای جوشکاری اصطکاکی اختلاطی نقطه‌ای (FSSW) در حالت لبه روی هم از ورق‌های آلایژ آلومینیم 2024-T3 به ضخامت ۳ mm استفاده شد. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی این آلایژ در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلایژ مورد استفاده

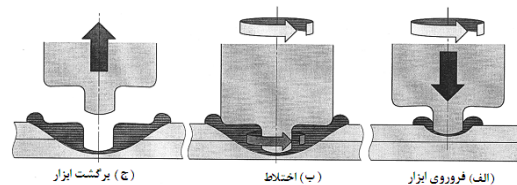
عنصر	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
Wt%	bal	۰/۲۱	۰/۳۸	۴/۸۴	۰/۵۵	۱/۵۲	۰/۰۷

جدول (۲): خواص مکانیکی فلز پایه Al 2024-T3

استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	درصد ازدیاد طول	سختی (ویکرز)
۴۶۰ ± ۶	۳۴۰ ± ۳	۱۹ ± ۱	۱۳۷ ± ۱/۵

ورق‌هایی به ابعاد ۱۷۰ × ۱۳۰ × ۳ mm برای جوشکاری برش زده شدند. سطح کلیه ورق‌ها قبل از جوشکاری سنگ زده شد و عمل سمباده زنی تا سمباده با شماره مش ۴۰۰ انجام شد تا اثر ناخالصی‌ها در فصل مشترک اتصال به حداقل برسد. سپس با استون تمیزکاری شدند. سرعت دوران ابزار ۴۵۰ RPM انتخاب شد و در چهار زمان توقف ۰/۳، ۳، ۷ و ۱۲ ثانیه جوشکاری شدند. ابزار در این فرایند شامل یک شانه‌ی ابزار^۶ و یک پین دندانه‌دار چپگرد با گام ۰/۸ mm می‌باشد که در شکل ۲ به صورت شماتیک نشان داده شده است. قطر شانه‌ی ابزار، قطر بالایی و پایینی پین به ترتیب ۲۸، ۸ و ۶ است. جنس ابزارها از فولاد ابزار گرم کار H13 با سختی HRC ۵۵ بود.

کرده است که با استفاده از حرکت چرخشی ابزار (شامل یک پین و یک شانه ابزار) به درون دو ورق و سپس برگشتن به عقب و به جا گذاشتن یک سوراخ، باعث ایجاد اتصال نقطه‌ای می‌شود [۳]. روش جوشکاری اصطکاکی اختلاطی نقطه‌ای شبیه به فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی است، فقط به جای حرکت ابزار در طول خط اتصال، ابزار فقط در قسمت بالای نمونه که در شکل ۱ نمایش داده شده است، فرو می‌رود. این روش در صنایع اتومبیل سازی به عنوان روش جایگزینی برای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای آلومینیم مطرح شده است [۴-۵]. فرایند جوشکاری FSSW می‌تواند به طور قابل توجهی سریع انجام شود، به طور مثال، زمان جوشکاری اصطکاکی اختلاطی نقطه‌ای آلایژ آلومینیم ۶۰۶۱ به ضخامت ۱ mm، حدود ۲ ثانیه گزارش شده است [۶-۷]. مهمترین مزیت فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی نقطه‌ای در قیاس با روش‌های متداول جوشکاری نقطه‌ای این است که می‌تواند بدون ذوب فلز پایه، فرایند جوشکاری را انجام دهد [۵]. تاکنون تحقیقات مختلفی بر روی اتصال آلایژهای مختلف آلومینیم توسط فرایند FSSW انجام شده است. زمان توقف، سرعت دورانی ابزار و هندسه‌ی ابزار از مهمترین پارامترهای فرایند FSSW هستند که بر روی خواص ریزساختاری و مکانیکی جوش تأثیر قابل توجهی دارند [۷-۱۰].



شکل (۱): شماتیک مراحل جوشکاری اصطکاکی اختلاطی نقطه‌ای [۸].

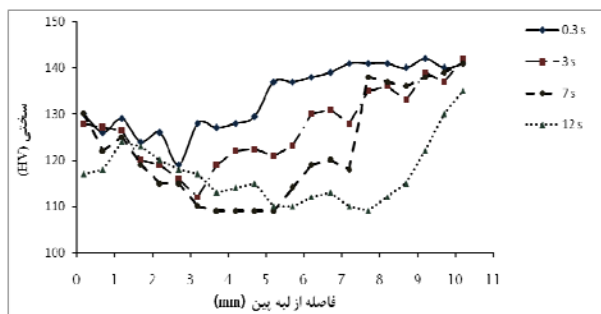
با وجود تحقیقات انجام گرفته بر روی روش جوشکاری اصطکاکی اختلاطی نقطه‌ای، هنوز نکات مبهم بسیاری در مورد این روش وجود دارد. جهت دوران ابزار یکی از مهمترین پارامترهای این فرایند است که بر نحوه‌ی سیلان مواد اطراف پین، نحوه‌ی قرارگیری فصل مشترک دو ورق در نزدیکی

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی خواص مکانیکی

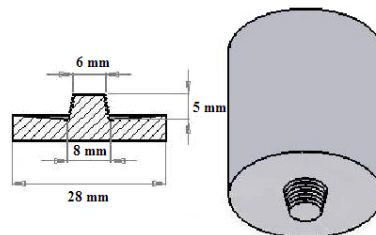
۳-۱-۱- نتایج سختی سنجی

در شکل ۴ نشان داده شده است که سختی با دور شدن از منطقه اتصال ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش زمان توقف از ۰/۳ تا ۱۲ ثانیه، سختی در مناطق اختلاط و متأثر از حرارت، کاهش می‌یابد. عامل افزایش سختی و استحکام در آلیاژ ۲۰۲۴، تشکیل رسوبات بسیار ریز Al_2CuMg یا همان S در زمینه آلیاژ می‌باشد [۷، ۱۲-۱۳]. با اعمال حرارت نسبتاً بالا در حین فرایند FSSW، این رسوبات یا در زمینه حل می‌شوند یا درشت می‌شوند. در نتیجه سختی در مناطق حرارت دیده کاهش می‌یابد. با افزایش زمان توقف ابزار در ماده، حرارت ورودی افزایش پیدا می‌کند و عرض منطقه‌ی اختلاط و منطقه‌ی متأثر از حرارت افزایش می‌یابد. این نتایج با نتایج حاصل از تحقیقات قبلی انجام شده توسط Tran و همکارانش [۵] و توسط Su و همکارانش [۱۴] مطابقت دارد.



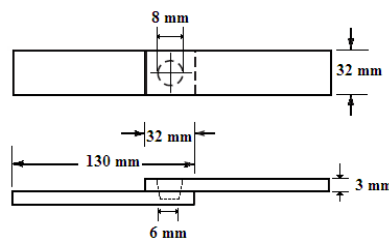
شکل (۴): تغییرات سختی در مناطق مختلف جوش با تغییر زمان توقف، با جهت دوران ابزار هم‌جهت با شیار بین (ساعتگرد) و در سرعت دورانی ۴۵۰ RPM.

بر اساس تغییرات ایجاد شده در ریزساختار آلیاژهای آلومینیم حین جوشکاری FSSW، سه منطقه‌ی مجزا تشکیل می‌شود. (۱) منطقه‌ی اختلاط یا SZ^۷ که سیلان ناشی از عبور ابزار جوشکاری را تجربه کرده است، (۲) منطقه‌ی تحت تأثیر فرآیند ترمومکانیکی یا TMAZ^۸ که در این منطقه اندازه‌ی دانه‌ها تغییر نمی‌کند و تنها در جهت کار مکانیکی کشیده می‌شوند، (۳) منطقه‌ی متأثر از حرارت یا HAZ^۹ که درشت شدن رسوبات و

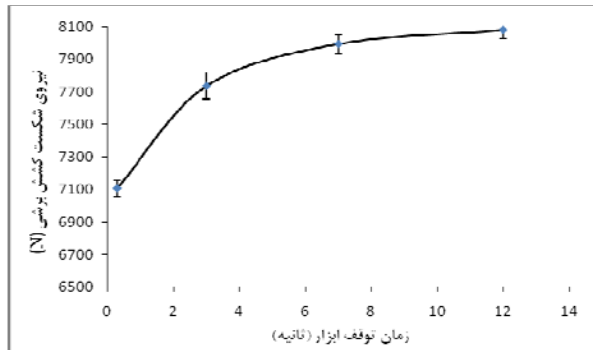


شکل (۲): شماتیک ابزار استفاده شده با گام بین ۰/۸ mm.

برای نگهداری ورق‌ها در حین فرایند از فیکسچر استفاده شد. بعد از نفوذ کامل ابزار به داخل ورق‌های آلومینیمی، شانه ابزار به اندازه ۰/۳ mm در داخل سطح ورق بالایی نفوذ داده شد. نمونه‌های متالوگرافی از قسمت میانی جوش تهیه شدند. مقطع عرضی نمونه‌های متالوگرافی با خمیر الماس پولیش شدند و با محلول Keller شامل ۲ mL اسید HF، ۳ mL اسید HCl، ۵ mL اسید HNO₃ و ۱۹۰ mL آب مقطر، اچ شدند. برای بررسی درشت ساختار از میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۷ برابر استفاده شد. برای بررسی دانه بندی و ریزساختار مناطق کناری جوش از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. عمود بر مقطع جوش‌ها، نمونه برداری انجام شد و توسط دستگاه ریزسختی سنجی با بار اعمال شده‌ی ۰/۱ kgf پروفیل سختی از مقطع عرضی نمونه‌ها بدست آمد. نمونه‌های آزمون استحکام کششی - برشی طبق استاندارد AWS-D17.2 [۱۱] تهیه گردید که در شکل ۳ طرح شماتیک آن نشان داده شده است. آزمون کشش - برش با سرعت فک ۱ mm/min انجام گردید و بر حسب بیشترین نیروی اعمالی توسط دستگاه محاسبه گردید. از هر نمونه‌ی جوشکاری شده سه نمونه آزمون استحکام کشش برشی تهیه شد.

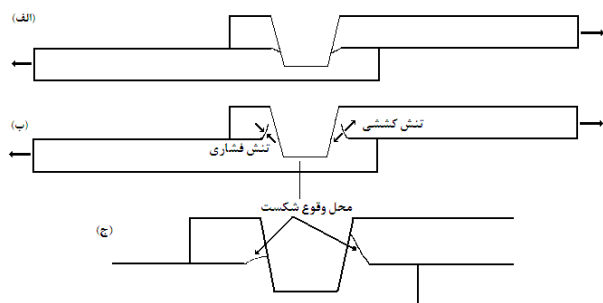


شکل (۳): نمونه آزمون کشش - برش طبق استاندارد AWS D17.2 [۱۱].



شکل (۶): نیروی شکست کششی - برشی با تغییر زمان توقف.

شکل ۷ مقطع عرضی نمونه‌های آزمون کشش برش را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷-الف نحوه‌ی شکست نمونه‌های جوشکاری شده با جهت دوران ابزار پادساعتگرد در دو سمت سوراخ در امتداد هوک است و استحکام پایینی بدست آمد. در شکل ۷-ب نشان داده شده است که در سمت راست سوراخ که به دو طرف هوک تنش کششی وارد می‌شود، پارگی در امتداد هوک می‌باشد، و در سمت چپ سوراخ که به دو طرف هوک تنش فشاری وارد می‌شود، پارگی از درون منطقه‌ی اختلاط عبور می‌کند. این موضوع به صورت شماتیک در شکل ۷-ج نشان داده شده است.



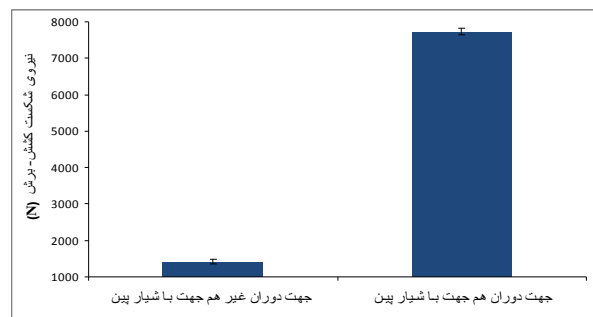
شکل (۷): شماتیک مقطع عرضی از نحوه‌ی اعمال بار بر نمونه‌های آزمون کشش برش و تأثیر آن بر نوع شکست، الف) نمونه‌ی با جهت دوران پادساعتگرد، ب) نمونه‌ی با جهت دوران ساعتگرد و ج) محل وقوع شکست در دو سمت سوراخ در نمونه شکل ب.

دانه‌ها در این منطقه گزارش شده است.

در تمام نمونه‌ها و با توجه به منحنی‌های شکل ۴، نقطه‌ی مینیمم در بیشترین زمان توقف ابزار یعنی ۱۲ ثانیه، به مقدار زیادی به سمت فلز پایه حرکت کرده است که نشان می‌دهد مناطق کناری جوش شامل مناطق SZ، TMAZ و HAZ به علت افزایش حرارت ورودی گسترده‌تر شده‌اند.

۳-۱-۲- نتایج آزمون کشش-برش

نتایج حاصل از آزمون‌های کشش-برش به صورت ماکزیمم نیروی شکست بر حسب پارامترهای جوشکاری در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، جهت دوران ابزار به طور قابل توجهی بر روی نیروی شکست تأثیر گذار است. در واقع شکل ۵ نقش حیاتی جهت دوران ابزار در ابزارهای شیاردار را نشان می‌دهد. بنابراین به دلیل چپ‌گرد بودن شیار پین در این پژوهش، ابزار فقط قابلیت اختلاط کنندگی خوبی در جهت دوران ساعتگرد را دارد. شکل ۶ نشان می‌دهد با افزایش زمان توقف ابزار از ۰/۳ ثانیه تا ۱۲ ثانیه، نیروی شکست از ۷۱۰۶ به ۸۰۸۰ نیوتن افزایش می‌یابد و سپس به حد اشباع یا ثابتی می‌رسد. دلیل تغییرات در خواص مکانیکی نمونه‌ها که در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شدند را باید در ریزساختار جستجو کرد که در ادامه (بخش ۳-۲) تغییرات ریزساختار در نمونه‌های جوشکاری شده بررسی خواهد شد.



شکل (۵): نیروی شکست با تغییر جهت دوران ابزار، در زمان توقف ۳ ثانیه و سرعت دورانی ابزار ۴۵۰ RPM.

هم‌جهت با شیار پین (ساعتگرد) بوده است. در این شکل مشاهده می‌شود که هوک یا همان فصل مشترک دو ورق به سمت بالا تغییر شکل پیدا کرده است.

در نمونه‌ی جوشکاری شده با جهت دوران ابزار غیر هم‌جهت با شیار پین، هوک یا فصل مشترک دو ورق، به دلیل چپ‌گرد بودن شیار ابزار، به سمت پایین تغییر شکل داده است. مساحت و عرض کم منطقه‌ی اختلاط نیز به اندازه‌ای نیست که فصل مشترک ورق‌ها را اطراف پین از بین ببرد و منطقه‌ی اتصال را بوجود بیاورد.

به دلیل پایین آمدن هوک، فصل مشترک ورق‌ها از منطقه‌ی اختلاط دور شده یا فرار کرده است. بنابراین به دلیل عدم وجود منطقه‌ی اختلاط مناسب، جهت اتصال در نمونه‌های با جهت دوران ابزار پادساعتگرد، اتصالات مناسبی حاصل نشد. افزایش بسیار زیاد نیروی شکست در جوش با جهت دوران ابزار ساعتگرد نسبت به جوش با جهت دوران ابزار پادساعتگرد (شکل ۵) به دلیل تغییر جهت هوک از پایین به بالا و از بین رفتن فصل مشترک دو ورق در نزدیک لبه‌ی پین است.



(الف)



(ب)

شکل (۹): تصاویر ماکروگرافی از مقطع جوش در جهت دوران‌های مختلف ابزار، با سرعت دورانی ابزار ۴۵۰ RPM و زمان توقف ۱۲ ثانیه: (الف) غیر هم-جهت با شیار پین و (ب) هم‌جهت با شیار پین.

شیار روی پین برای آسان‌سازی اختلاط در حین جوشکاری طراحی شده است. جهت خاص شیار بر روی پین فقط در یک جهت خاص می‌تواند نقش اختلاط‌کنندگی را ایفا کند. به دلیل چپ‌گرد بودن شیار پین، جهت دوران ساعتگرد باعث حرکت

نحوه‌ی شکست نمونه‌های جوشکاری شده با جهت دوران ابزار ساعتگرد در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که قبلاً اشاره شد و در این شکل نیز مشاهده می‌شود حالت شکست در دو سمت سوراخ متفاوت است. در یک سمت تنش کششی باعث وقوع شکست از امتداد فصل مشترک نیمه متالورژیکی یا هوک می‌شود و در سمت دیگر تنش فشاری باعث وقوع شکست از درون منطقه‌ی اختلاط می‌شود. بنابراین حضور هوک سبب ایجاد تنش فشاری در قسمتی از اتصال می‌شود، که این مزیتی برای اتصال FSSW در مقایسه با اتصالات جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای (RSW) محسوب می‌باشد.

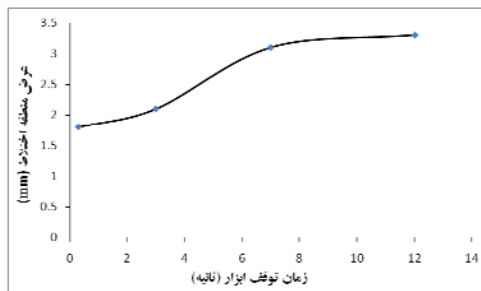
۲-۳- بررسی‌های متالوگرافی ۳-۲-۱- بررسی درشت ساختار جوش



شکل (۸): نمونه‌ی پاره شده در آزمون کشش برش در حالت جوشکاری با جهت دوران ابزار ساعتگرد، (الف) ورق‌های جدا شده، (ب) نمای زیرین از ورق رویی و (ج) نمای رو از ورق پایینی.

همانطور که در تصاویر ماکروگرافی شکل ۹-الف مشاهده می‌شود، در نمونه‌ی جوشکاری شده با جهت دوران ابزار غیر هم‌جهت با شیار پین (جهت دوران ابزار پادساعتگرد)، هوک به سمت پایین تغییر شکل یافته و باعث شده است که ابعاد منطقه‌ی اختلاط برای از بین بردن فصل مشترک ورق‌ها نزدیک لبه‌ی پین کافی نباشد. شکل ۹-ب مربوط به تصویر ماکروگرافی مقطع جوش نمونه‌ای است که حین جوشکاری، جهت دوران ابزار

مساحت و عرض منطقه اختلاط، به دلیل افزایش سطح مؤثر مقاومت کننده در برابر تنش کشش برشی، نیروی شکست افزایش می‌یابد. همانطور که در تحقیقات قبلی نیز آمده است [۷ و ۹]، با افزایش مساحت و عرض منطقه اختلاط، به دلیل افزایش سطح مؤثر مقاومت کننده در برابر تنش کشش برشی، نیروی شکست افزایش می‌یابد.

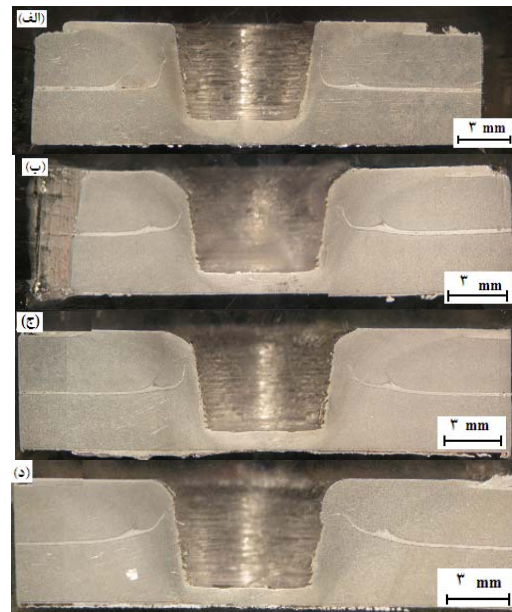


شکل (۱۱): تغییرات عرض منطقه اختلاط با تغییر زمان توقف.

۳-۲-۲- بررسی‌های ریزساختاری

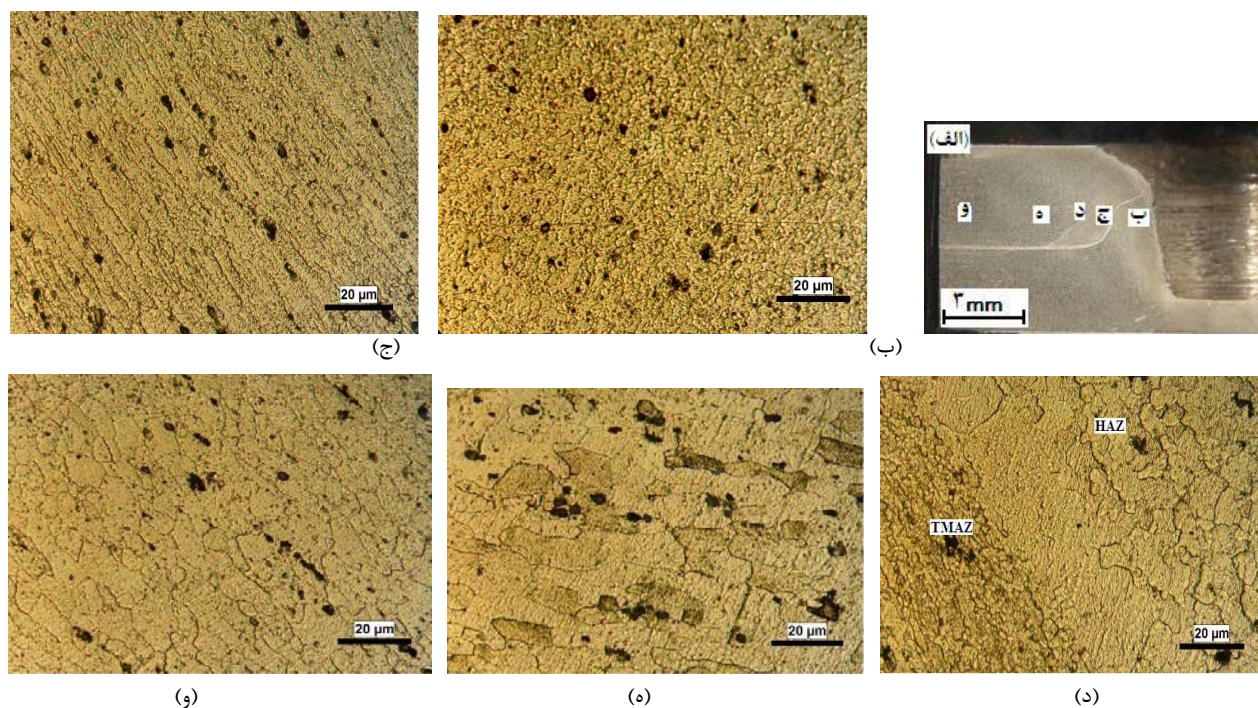
در شکل ۱۲ ریزساختار مناطق مختلف کنار جوش شامل منطقه‌ی اختلاط (SZ)، منطقه‌ی متأثر از عملیات ترمومکانیکی (TMAZ)، منطقه‌ی متأثر از حرارت (HAZ) و فلز پایه (BM) به ترتیب دور شدن از لبه‌ی پین نشان داده شده‌اند. همانطور که در شکل ۱۲-الف نمایان است اولین منطقه‌ی نزدیک به لبه‌ی پین منطقه‌ی اختلاط است. ذرات Al_2CuMg موجود در آلیاژ در این ناحیه در مقایسه با فلز پایه (شکل ۱۲-و) بسیار ریزتر هستند. به دلیل کار مکانیکی شدید در دمای بالا حین فرآیند جوشکاری، دانه‌های بسیار ریز و کاملاً هم محور^۱ در منطقه‌ی اختلاط با مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی تشکیل می‌شوند. منطقه‌ی دیگری که در شکل ۱۲-ج مشاهده می‌شود منطقه‌ی متأثر از عملیات ترمومکانیکی (TMAZ) است. این منطقه ساختار تغییرشکل یافته شدیدی دارد، دانه‌های کشیده شده فلز پایه تحت یک الگوی جریان رو به بالا در اطراف منطقه‌ی جوش تغییر شکل یافته‌اند

مواد اطراف به سمت بالا می‌شود، از این رو در این نمونه‌ها هوک یا فصل مشترک متالورژیکی به سمت بالا حرکت یافته است (شکل ۹). به عبارت دیگر با تغییر جهت دوران ابزار، سیلان رو به پایین تبدیل به سیلان رو به بالا می‌شود، سیلان رو به بالا سبب نزدیک شدن هوک به منطقه بالای منطقه اختلاط که متأثر از شانه پین است شده است. در این منطقه عرض منطقه اختلاط بیشتر و بنابراین هوک یا فصل مشترک ورق‌ها از لبه‌ی سوراخ پین فاصله می‌گیرد و خواص برشی افزایش می‌یابد. عرض منطقه اختلاط در تحقیقات دانشمندان به صورت فاصله‌ی شروع تغییر شکل فصل مشترک دو ورق تا لبه‌ی پین تعریف شده است [۷ و ۹]. در تصاویر شکل ۱۰ سطح مقطع نقطه جوش‌ها نشان داده شده است. داده‌های ابعاد منطقه‌ی اختلاط به دست آمده از نرم‌افزار آنالیز تصویر (Image Analyzer)، بر روی نمودار شکل ۱۱ نمایان شده است.



شکل (۱۰): تصاویر ماکروگرافی از مقاطع نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت دورانی RPM ۴۵۰ و زمان‌های توقف: الف) ۰/۳ ثانیه، ب) ۳ ثانیه، ج) ۷ ثانیه و د) ۱۲ ثانیه.

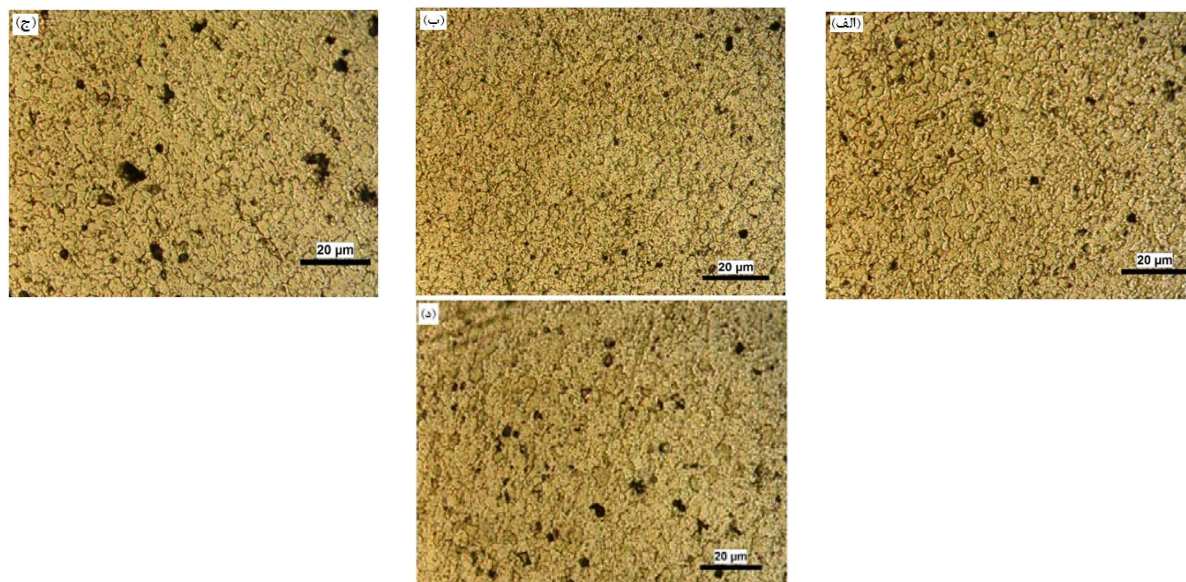
همانطور که در تصاویر نیز نمایان است با افزایش زمان توقف ابزار، عرض منطقه‌ی اختلاط افزایش یافته است. با افزایش



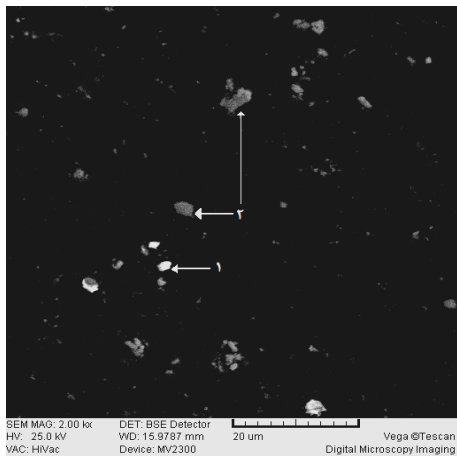
شکل (۱۲): مناطق مختلف کنار جوش در نمونه‌ی با زمان توقف ۰/۳ ثانیه: الف) تصویر ماکروگرافی از مقطع جوش، ب) منطقه اختلاط (SZ)، ج) منطقه متأثر از عملیات ترمومکانیکی (TMAZ)، د) مرز منطقه TMAZ و HAZ، ه) منطقه متأثر از حرارت (HAZ)، و) فلز پایه (BM).

ذرات موجود در آلیاژ درشت‌تر از منطقه‌ی اختلاط هستند. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌شود که با افزایش زمان توقف در ماده، اندازه دانه در منطقه اختلاط افزایش یافته است زیرا با افزایش زمان، دانه‌ها در حین تبلور مجدد دینامیکی، حرارت ورودی بالاتری

منطقه TMAZ، تغییر شکل پلاستیک و حرارت را باهم تجربه می‌کند که ناشی از دوران پین شیاردار با سرعت زیاد و اصطکاک ابزار جوشکاری با مواد اطراف است. منطقه متأثر از حرارت (HAZ) نیز در شکل ۱۲- نشان داده شده است و مشاهده می‌شود که دانه‌ها و



شکل (۱۳): ریزساختار منطقه اختلاط در زمان‌های توقف مختلف: الف) ۰/۳ ثانیه، ب) ۳ ثانیه، ج) ۷ ثانیه و د) ۱۲ ثانیه



شکل (۱۵): دو نوع ذره شناسایی شده در مناطق مختلف (SZ، TMAZ، HAZ و BM) تمامی نمونه‌ها.

ذره‌ی شماره‌ی ۲ که خاکستری رنگ و در قسمت‌های مختلف به صورت گوشه‌دار پراکنده شده‌اند، دارای مقادیر نسبتاً زیادی آهن، منگنز و مس است. این ذره نیز با توجه به درصد اتمی عناصر و تحقیقات قبلی انجام شده احتمالاً از جنس $Al_6CuFeMn$ است [۱۵]. امکان حل شدن این ذرات در محلول جامد در حین فرایند FSSW به دلیل دمای ذوب بالا وجود ندارد زیرا این ذرات در آلیاژ در هنگام فرایند انجماد اولیه بوجود آمده‌اند و تنها دچار خردایش می‌شوند.

جدول (۳): آنالیز ذره شماره ۱ در شکل ۱۵

عنصر	٪ درصد وزنی	٪ درصد اتمی
Mg	۱۰/۹۷	۱۵/۰۰
Al	۵۴/۲۳	۶۶/۸۰
Cu	۳۴/۸۰	۱۸/۲۰

جدول (۴): آنالیز ذره شماره ۲ در شکل ۱۵

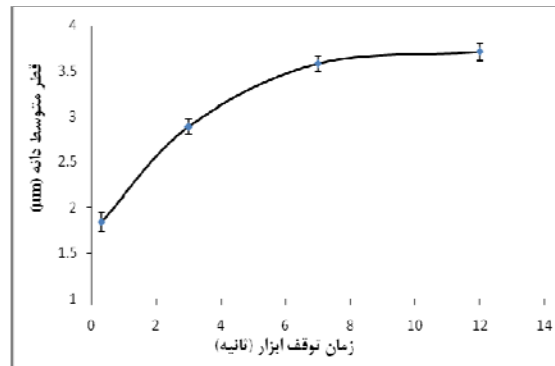
عنصر	٪ درصد وزنی	٪ درصد اتمی
Al	۶۱/۳۹	۷۶/۴۳
Mn	۷/۲	۵/۵۴
Fe	۱۵/۱۲	۹/۴۲
Cu	۱۶/۲۹	۸/۶۱

دریافت می‌کنند و دانه‌ها درشت‌تر می‌شوند که در تحقیقات Gerlich و همکارانش [۱۵ و ۱۰] نیز پیشنهاد شده است.

همانطور که در نمودار شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، با افزایش زمان توقف از ۰/۳ ثانیه تا ۱۲ ثانیه قطر متوسط دانه‌ها حدود ۲ برابر شد و از $1/84 \pm 0/2 \mu m$ به $3/77 \pm 0/1 \mu m$ تغییر یافت.

زمان توقف ابزار به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای فرایند FSSW نقش مؤثری بر خواص مکانیکی جوش دارد. همانطور که نتایج نشان داد، با افزایش زمان توقف، به دلیل افزایش عرض منطقه‌ی اختلاط، نیروی شکست کششی برشی افزایش قابل ملاحظه‌ای داشت که این با درشت شدن دانه‌ها (با افزایش زمان توقف)، در این ناحیه تناقض دارد. در واقع عامل بزرگ شدن عرض منطقه‌ی اختلاط بر درشت شدن دانه‌ها غلبه می‌کند و باعث افزایش خواص مکانیکی می‌شود.

در تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، دو نوع ذره تشخیص داده شد. شکل ۱۵ یک نمونه از این تصاویر است که در آن دو نوع ذره را می‌توان مشاهده نمود که با شماره‌های ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند. این ذرات در مشاهده با شناساگر الکترون برگشتی به دو نوع خاص تقسیم می‌شوند. یکی ذرات روشن که نشان از سنگین‌تر بودن آنان می‌دهد، با مورفولوژی شبه کروی و دیگری ذرات خاکستری رنگ با مورفولوژی گوشه‌دار. در دو جدول ۳ و ۴ آنالیزهای این دو نوع ذره که با EDS بدست آمده‌اند، نشان داده شده است. ذره‌ی شماره‌ی یک که روشن‌تر است، غنی از مس و منیزیم است و دارای حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد وزنی مس و تا ۱۱ درصد وزنی منیزیم است. با توجه به منابع موجود [۱۶]، این ذره از جنس Al_2CuMg است.



شکل (۱۴): قطر متوسط دانه‌ها در منطقه‌ی اختلاط با افزایش زمان توقف.

- Spot Friction Welds Between Aluminum 5754-O and 7075-T6 Sheets”, *Journal of Materials Processing Technology*, in press, 209, pp. 3724-3739, 2008.
- [6] H. Badarinarayan, Q. Yang, S. Zhu, “Effect of Tool Geometry on Static Strength of Friction Stir Spot-Welded Aluminum Alloy”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49, pp. 142-148, 2009.
- [7] Y. Tozaki, Y. Uematsu, K. Tokaji, “Effect of Tool Geometry on Microstructure and Static Strength in Friction Stir Spot Welded Aluminium Alloys”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47, pp. 2230-2236, 2007.
- [8] M. Awang, V. H. Mucino, Z. Feng, and S. A. David, “Thermo-Mechanical Modeling of Friction Stir Spot Welding (FSSW) Process: Use of an Explicit Adaptive Meshing Scheme”, *Science and Engineering*, Volume 01, pp. 1251-1256, 2005.
- [9] H. Badarinarayan, Y. Shi, X. Li, K. Okamoto, “Effect of Tool Geometry on Hook Formation and Static Strength of Friction Stir Spot Welded Aluminum 5754-O Sheets”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Volume 49, pp. 814-823, 2009.
- [10] Gerlich, P. Su, M. Yamamoto, T. H. North, “Effect of Welding Parameters on the Strain Rate and Microstructure of Friction Stir Spot Welded 2024 Aluminum Alloy”, *Journal of Material Science* 42, pp. 5589-5601, 2007.
- [11] G. Buffa, L. Fratini, M. Piacentini, “On the Influence of Tool Path in Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 208, pp. 309-317, 2008.
- [12] D. Fersini, A. Pirondi, “Fatigue Behavior of Al2024-T3 Friction Stir Welded Lap Joints”, *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 74, pp. 468-480, 2007.
- [13] C. Genevois, D. Fabregue, A. Deschamps, W. J. Poole, “On the Coupling Between Precipitation and Plastic Deformation in Relation with Friction Stir Welding of AA2024 T3 Aluminum Alloy”, *Materials Science and Engineering A*, Volume 441, pp. 39-48, 2006.
- [14] P. Su, A. Gerlich, T.H. North, and G.J. Bendzsak, “Intermixing in Dissimilar Friction Stir Spot Welds”, *Metallurgical And Materials Transactions A*, Volume 38, pp. 584-595, 2007.
- [15] A. Gerlich, G. Avramovic-Cingara, and T.H. North, “Stir Zone Microstructure and Strain Rate during Al 7075-T6 Friction Stir Spot Welding”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Volume 37, pp. 2773-2786, 2006.
- [16] C. R. Brooks, “Heat treatment structure and properties of nonferrous alloys”, 3rd edition, American society of metals, chapter 4, pp. 115-139, 1982.
- #### ۴- نتیجه‌گیری
- در تحقیق حاضر اثر جهت دوران ابزار بر خواص مکانیکی و متالورژیکی جوش در اتصال لبه روی هم ورق‌های آلایژ آلومینوم 2024-T3 به ضخامت 3 mm توسط فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی نقطه‌ای بررسی شده است که نتایج زیر حاصل شده است؛
- ۱- نیروی شکست کشش برشی با تغییر جهت هوک از پایین به بالا، به مقدار قابل توجهی افزایش یافت که ناشی از دور شدن هوک یا فصل مشترک ورق‌ها از لبه‌ی سوراخ پین است.
- ۲- با افزایش زمان توقف، عرض منطقه‌ی اختلاط افزایش یافته و بنابراین نیروی کشش - برش افزایش می‌یابد.
- ۳- با افزایش زمان توقف، سختی منطقه‌ی اختلاط کاهش و همچنین میزان افت سختی در مناطق HAZ و TMAZ افزایش یافت که ناشی از درشت شدن دانه‌ها در این منطقه با افزایش زمان توقف است.
- ۴- اثر مثبت افزایش زمان توقف که همان افزایش عرض منطقه اختلاط می‌باشد بر اثر منفی افزایش زمان توقف (افزایش اندازه دانه و رسوبات در مناطق HAZ و TMAZ) غلبه دارد.
- ۵- حضور هوک سبب ایجاد تنش فشاری در قسمتی از اتصال می‌شود، که این مزیتی برای اتصال FSSW در مقایسه با اتصالات جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای (RSW) محسوب می‌شود.
- #### ۵- مراجع
- [1] S. Kou, “Welding Metallurgy”, Second Edition, 2003, Wiley Interscience, New Jersey, U.S.
- [2] J. F. Lancaster, "Metallurgy of welding", 6th Edition, 1999, Abington, England.
- [3] A. Gerlich, P. Su, T. H. North, “Tool Penetration During Friction Stir Spot Welding of Al and Mg Alloys”, *Journal of Materials Science* 40, pp. 6473-6481, 2005.
- [4] M. Awang, “Simulation of Friction Stir Spot Welding (FSSW) Process: Study of Friction Phenomena”, Dissertation Submitted to the College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University for the degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, 2007.
- [5] V. X. Tran, J. Pan, T. Pan, “Effects of Processing Time on Strengths and Failure Modes of Dissimilar

۶- پی نوشت

- 1 - Resistance Spot Welding.
- 2 - Friction Stir Welding.
- 3 - The Welding Institute.
- 4 - Friction Stir Spot Welding.
- 5 - Hook.
- 6 - Shoulder
- 7- Stir zone
- 8 - Thermo-mechanically affected zone
- 9 - Heat affected zone
- 10 - Equiaxed