

تأثیر زمان نگهداری و قطر شانه ابزار بر استحکام و رفتار شکست فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای زائده‌ای آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴

فاطمه زرقانی^۱، سید مصطفی موسوی زاده^۲، غلامرضا ابراهیمی^{۳*} و حمید رضا عزت پور^۴
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۱۱، ش.ص ۱۳-۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۰۵)

چکیده

در پژوهش حاضر، یک تکنیک جدید از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با هدف حذف فرورفتگی مورد بررسی قرار گرفته است. این روش در مورد ورق‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ با ضخامت ۱ میلی متر، تحت اثر سرعت چرخش ثابت و با تغییر قطر شانه ابزار و زمان نگهداری ابزار انجام شده است. اثر قطر شانه و زمان نگهداری ابزار بر خواص مکانیکی مورد ارزیابی و بحث قرار گرفته است. ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که این روش جدید دارای قابلیت ایجاد فصل مشترک متالورژیکی بدون عیب به همراه ساختار همگن و دانه ریز در ناحیه جوش می‌باشد. به گونه‌ای که اندازه دانه از ۲۱ میکرومتر در فلز پایه به ۵ میکرومتر در ناحیه همزده کاهش یافته و نیز اتصالات، نیروی شکست بالاتر از ۶۰۰۰ نیوتون را نشان دادند. سطح اتصال، عمق ناحیه همزده، ضخامت ورق بالا، هندسه هوک، اندازه دانه و ذوب موضعی از جمله عوامل اثر گذار بر خواص مکانیکی هستند که با تغییر پارامترهای فرآیند تغییر می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، خواص مکانیکی، وضعیت شکست، آلومینیوم ۲۰۲۴.

^۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

^۲ - استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

^۳ - دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

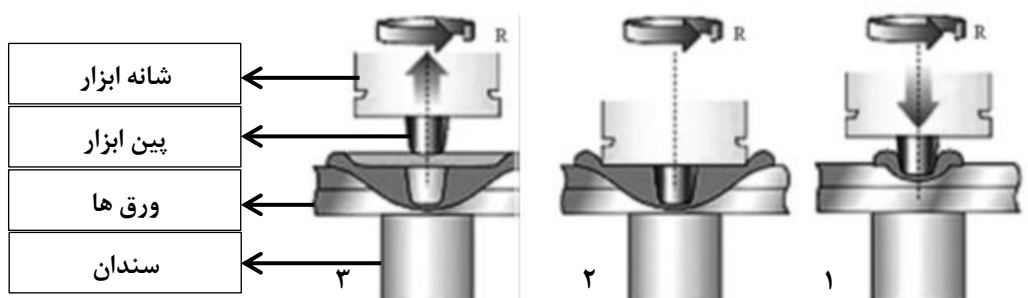
^۴ - استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فناوری های نوین سبزواری، سبزوار، ایران

*-نویسنده مسئول مقاله: Ebrahimi@hsu.ac.ir

پیشگفتار

کاهش وزن اجزای سازه‌ای با هدف رسیدن به عملکرد بالاتر و مصرف انرژی کم‌تر همواره مورد توجه صنایع بوده و به همین منظور استفاده از مواد با وزن سبک از قبیل آلومینیوم در صنایع خودرو سازی و هوا فضا رو به گسترش است [۱]. هر چند روش جوش نقطه‌ای مقاومتی به طور گسترده به عنوان روش اتصال نقطه‌ای برای اتصال ورق‌های نازک در صنایع خودرو سازی و هوا فضا استفاده می‌شود؛ اما بکارگیری این روش برای جوشکاری آلومینیوم به علت مقاومت الکتریکی پایین این آلیاژ و در نتیجه نیاز به جریان‌های زیاد برای ذوب موضعی آلیاژ با مشکلات و محدودیت‌هایی همراه می‌باشد [۲]. علاوه بر این، این روش دارای معایبی دیگری مانند مصرف انرژی بالا، هزینه تجهیزات نسبتا بالا و عدم ایجاد خواص کاملا مطلوب به‌ویژه در مورد فولادهای سختی پذیر است [۳]. در سال ۲۰۰۱ صنعت خودروسازی روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای را با توجه به مزایای ویژه آن از جمله مصرف انرژی کم‌تر و هزینه تجهیزات کم‌تر نسبت به جوشکاری مقاومتی گسترش داد [۴]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای روشی ابداع شده براساس جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است [۵،۶]. این روش جوشکاری یک فرآیند اتصال حالت جامد است که در آن یک ابزار چرخان با طراحی خاص در ابتدا به ورق بالا وارد شده، سپس در اثر چرخش ابزار و تولید گرمای اصطکاکی مواد نرم شده و تغییر شکل پلاستیکی اتفاق می‌افتد و در نهایت یک اتصال حالت جامد بین سطح ورق بالا و پایین ایجاد

می‌شود [۷،۸]. یک تصویر شماتیک از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در شکل ۱ نشان داده شده است، فرآیند شامل سه مرحله ۱- فروروی ابزار، ۲- همزدن مواد و ۳- خروج ابزار است، تفاوت روش اصطکاکی اغتشاشی با روش اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در حرکت خطی ابزار است، در روش اصطکاکی اغتشاشی ابزار پس از فروروی به سطح علاوه بر حرکت چرخشی یک حرکت خطی نیز دارد؛ اما در روش نقطه‌ای حرکت ابزار تنها محدود به حرکت چرخشی است [۹]. در این تکنیک هندسه ابزار از قبیل قطر شانه و پین، طول پین و شکل پین از پارامترهای موثر بر سیلان مواد و تولید گرما می‌باشند. وقتی هندسه ابزار ثابت باشد، سرعت چرخش و زمان نگهداری ابزار پارامترهای اصلی این روش هستند [۱۰]. روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای علاوه بر مصرف انرژی کم‌تر و هزینه تجهیزات پایین‌تر نسبت به روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای دارای مزایایی از قبیل ریزساختار کار شده حالت جامد و قابلیت اتصال فلزات سبک می‌باشد [۱۱]؛ لیکن مهم‌ترین عیب این فرآیند باقی ماندن فرورفتگی در اثر وجود پین ابزار می‌باشد [۱۲]. فرورفتگی، می‌تواند منجر به خوردگی موضعی و کاهش خواص مکانیکی مانند استحکام کششی و خستگی گردد [۱۳، ۱۴]. تکنیک‌های زیادی به منظور جلوگیری از تشکیل فرورفتگی و یا کاهش اثر آن مورد بررسی قرار گرفته است. مانند تکنیک پیچیده پرسازی مجدد [۱۵] که بر طبق گزارشات اتصالات حاصل از آن دارای استحکام کششی بالا بوده؛ اما استحکام خستگی در آن‌ها کاهش می‌یابد [۱۶].



شکل ۱- تصویر شماتیک از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای [۱۱]

آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ توسط گراگ و همکارانش گزارش شده است [۲۴]. آقای پایدار و همکارانشان نیز اثر پارامترهای فرآیند بر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای آلومینیوم ۲۰۲۴ را مورد بررسی قرار داده‌اند و طبق گزارشات فرورفتگی در تمام نمونه‌ها وجود دارد [۱۰]؛ اما در روش ارائه شده در این پژوهش سطح جوش کاملاً صاف است و فرورفتگی به طور کامل حذف شده است. در پژوهش حاضر، قابلیت اجرای جوشکاری و خواص مکانیکی و ریزساختاری جوش تحت اثر زمان نگهداری مختلف ابزار همراه با تغییر قطر شانه ابزار در سه اندازه مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، جهت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای از ورق‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ با ضخامت ۱ میلی متر و ابعاد ۱۰/۵×۴/۵ سانتی متر مورد استفاده قرار گرفته است. ترکیب شیمیایی فلز پایه در جدول ۱ گزارش شده است. قبل از فرآیند جوشکاری ورق‌های آلومینیوم به منظور حذف هرگونه آلودگی با استون تمیزکاری شدند. ابزار به کار گرفته شده در فرآیند از جنس فولاد H ۱۳ با قطرهای ۱۴ و ۱۶ و ۱۸ میلی متر است. در این تکنیک جدید فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای مطابق شکل ۲ با کمک ابزار بدون پین و سندان دارای برآمدگی انجام شده است. قطر و ارتفاع برآمدگی ثابت و به ترتیب برابر با ۱۰ و ۰/۴ میلی متر در نظر گرفته شده است. فرآیند جوشکاری توسط ماشین فرز مدل FP4M انجام شده و به منظور ثابت نگه‌داشتن نمونه‌ها در طول فرآیند از جک‌های پنوماتیک طراحی شده استفاده شده است (شکل ۳). جهت انجام جوشکاری ورق‌ها به طول ۳۵ میلی متر بر روی همدیگر مطابق شکل ۲ قرار گرفتند. فرآیند جوشکاری تحت اثر پارامترهای متغیر زمان نگهداری ابزار در سه سطح ۱۲، ۱۸ و ۱۸ ثانیه و قطر شانه ابزار در سه اندازه ۱۴ و ۱۶ و ۱۸ میلی متر و پارامترهای ثابت سرعت چرخش و ارتفاع برآمدگی rpm ۱۲۵۰ و ۰/۴ mm به ترتیب انجام شده است. با قرار دادن ترموکوپل‌های نوع K روی سطح بالایی و در مجاورت شانه ابزار تغییرات دمایی حین فرآیند اندازه‌گیری و ثبت شده است. همچنین به منظور بررسی ریزساختار ناحیه جوش، نمونه‌هایی از سطح مقطع این ناحیه تهیه و پس از آماده سازی سطح نمونه‌ها جهت

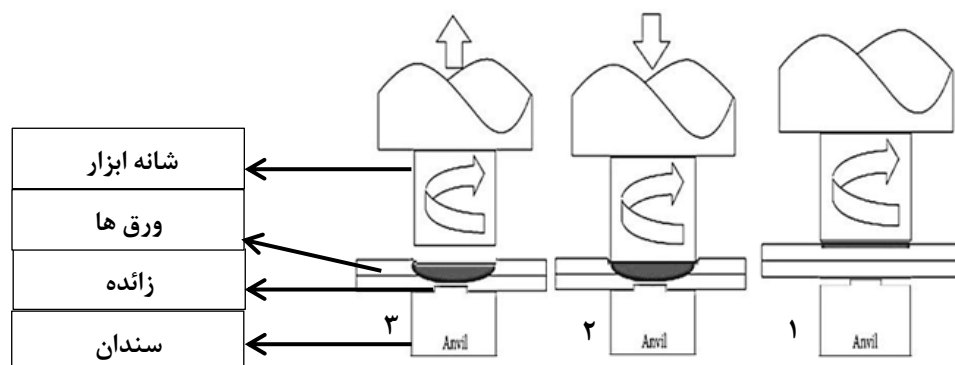
در سال ۲۰۰۹ تحقیقاتی در مورد فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با ابزار بدون پین صورت گرفت که در آن فرورفتگی به طور کامل حذف شد؛ اما مشخص شد که این روش تنها قابلیت جوشکاری ورق‌هایی با ضخامت کم‌تر از ۰/۶ میلی متر را دارد [۱۷]. در سال ۲۰۱۵ با تغییرات اعمال شده در روش بدون پین ورق‌هایی با ضخامت‌های بالاتر نیز به صورت موفقیت آمیزی جوشکاری شدند [۱۸]. روش دیگر حذف فرورفتگی استفاده از روش دو مرحله‌ای که مرحله اول آن استفاده از ابزار معمولی و مرحله دوم آن شامل ابزار بدون پین می‌باشد، این روش به طور موفقیت آمیزی روی آلیاژهای آلومینیوم ۶۰۶۱ و ۵۰۵۲ انجام شده است [۱۹]. روش‌های دیگر شامل قدم زدن [۲۰]، روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای از دو طرف [۲۱]، روش ابزار چرخان از دو طرف و روش ابزار طرح‌دار است. در این پژوهش، روش جدیدی برای حذف فرورفتگی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای ابداع و برای آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ به کار گرفته شده و شرایط مناسب برای ایجاد جوش با خواص ساختاری و استحکام مناسب مورد بررسی قرار گرفته است. این تکنیک شامل استفاده از سندان دارای برآمدگی طراحی شده روی آن، در زیر ورق‌ها و استفاده از ابزار بدون پین می‌باشد. تحقیقات اولیه انجام شده در این ارتباط نتایج بسیار موفقیت آمیزی با خواص متالورژیکی بالاتر نسبت به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای معمولی و نیز سایر روش‌های ابداع شده را نشان داده است و سطح جوشکاری نیز کاملاً صاف و بدون فرورفتگی است [۲۲]. تحقیقات مشابهی روی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای آلیاژهای آلومینیوم و اثر پارامترهای فرآیند بر کیفیت اتصال در سال‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفته است. به طور مثال لی و همکارانش بهینه‌سازی ابزار مورد استفاده در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای و اثر آن بر استحکام و مورفولوژی شکست در آلیاژ آلومینیوم 2A12 مورد بررسی قرار داده‌اند [۲۳]. در تحقیق دیگری بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم ۲۰۲۴ و مقایسه کیفیت اتصال با اتصال حاصل از روش مقاومتی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱]. اثر پارامترهای فرآیند نظیر سرعت چرخش و زمان نگهداری ابزار بر استحکام اتصال در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

SANTAM-20 با سرعت $3 \frac{mm}{min}$ انجام شده است. در هر شرایط آزمون کشش ۳ مرتبه انجام شده و نتایج میانگین گزارش شده است. به منظور بررسی دقیق مکانیزم‌های شکست تصاویر سطح شکست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند.

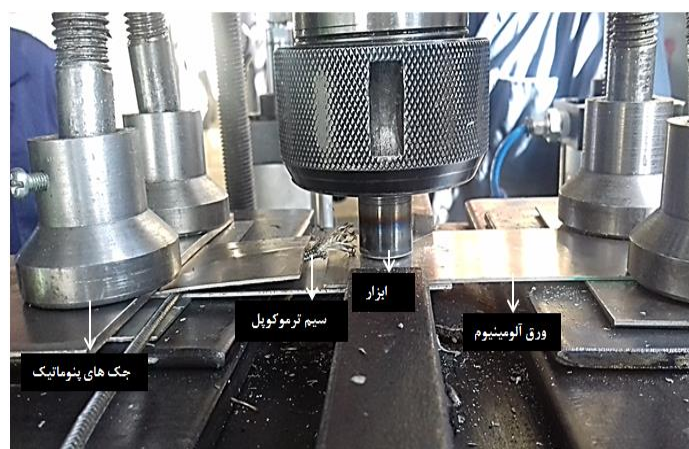
آشکارسازی ریزساختار از محلول حکاکی Keller (1 ml HF, 1.5 ml HCl, 2.5 ml HNO₃, 95 ml H₂O) به مدت زمان ۲۰ ثانیه استفاده شد. تصاویر ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری مدل Olympus GX51 مجهز به دوربین دیجیتال تهیه شده است و اندازه هر نمونه با روش تقاطع خطی مطابق با استاندارد ESTM-E112 اندازه گیری شده است به منظور ارزیابی خواص مکانیکی نمونه‌های با ابعاد استاندارد آزمون کشش-برش (۴/۵×۱۰/۵) براساس استاندارد آزمون کشش AWS و به کمک دستگاه

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم

Al	Cr	Cu	Mg	Fe	Mn	Si	Ti	Zr
پایه	۰/۰۱۲۳	۴/۹	۱/۲۸	۰/۲۳۹	۰/۶۲۹	۰/۰۸۴	۰/۰۱۵	۰/۱۴



شکل ۲- تصویر شماتیک از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای زائده‌ای



شکل ۳- تصویر واقعی از ابزار مورد استفاده، محل قرارگیری سیم ترموکوپل و جک‌های پنوماتیک

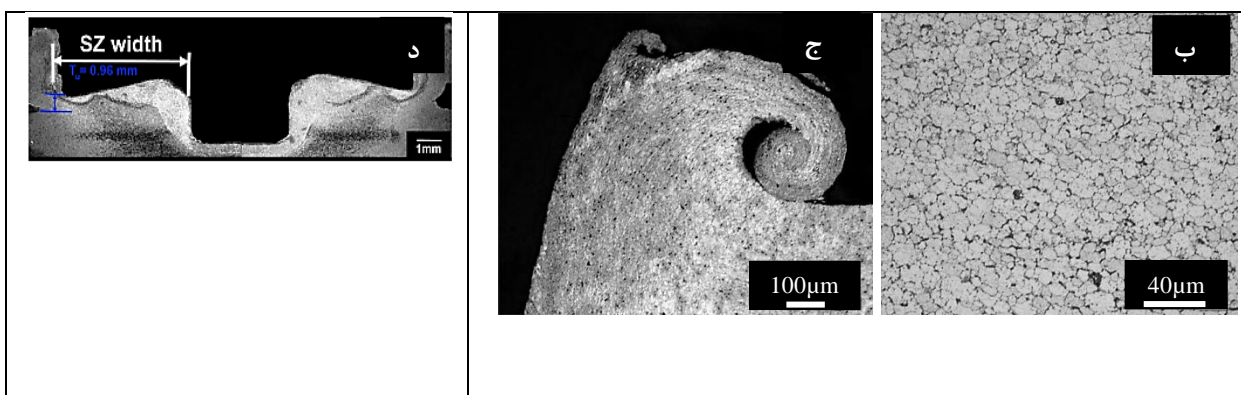
نتایج و بحث

گرفته‌اند. در اطراف جوش پلیسه‌هایی مشاهده می‌شود؛ این پلیسه‌ها درحقیقت همان مواد نرم شده زیر ابزار هستند که در اثر حرکت ابزار به لبه‌ها منتقل می‌شوند. ساختار پلیسه‌ها که در شکل ۴(ج) نشان داده شده است بیانگر جهت حرکت و سیلان مواد است.

سطح ظاهری

اثر زمان نگهداری و قطر شانه ابزار بر ویژگی‌های سطح ظاهری از جوش به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل‌ها و استفاده از ابزار بدون پین سطح ظاهری از جوش کاملاً صاف بوده و فرورفتگی مشاهده نمی‌شود و تغییر پارامترهای فرآیند، زمان نگهداری و قطر شانه ابزار سطح ظاهری اتصال را تغییر می‌دهد. با افزایش زمان نگهداری ابزار در لبه‌های جوش مقداری پلیسه مشاهده می‌شود. این عامل را می‌توان به دلیل اکستروود مواد نرم شده در اثر چرخش ابزار به لبه‌های جوش مرتبط دانست. با افزایش قطر شانه ابزار همان‌گونه که در شکل ۶ دیده می‌شود، اندازه اتصال نقطه-ای ایجاد شده بزرگ‌تر بوده؛ اما صافی سطح همچنان برقرار است.

شکل ۴ (الف) ویژگی‌های هندسی سطح مقطع جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی زائده‌ای را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است به دلیل استفاده از ابزار بدون پین هیچ گونه فرورفتگی دیده نمی‌شود. در سطح بالا از جوش تنها اثر شانه ابزار و پلیسه‌های لبه‌های جوش و در سطح پایین نیز اثر زائده کار دیده می‌شود. جهت مقایسه سطح مقطع نمونه جوشکاری شده با فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولی شکل ۴(د) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، در روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولی فرورفتگی بسیار بزرگ‌تر در اثر وجود پین مشاهده می‌شود. نواحی تیره‌تر در شکل ۴(الف) ناحیه همزده می‌باشد که شامل دانه‌های ریز هم محور است (شکل ۴(ب)) که در اثر تبلور مجدد دینامیکی به دلیل گرمای اصطکاکی و تغییر شکل شدید ناشی از چرخش ابزار ایجاد شده است [۵]. فاصله فصل مشترک بین ورق بالا و پایین تا محل تحت اثر شانه ابزار به عنوان ضخامت ورق بالا در نظر گرفته می‌شود. پارامترهایی مانند ضخامت ورق بالا، عمق ناحیه همزده و مساحت اتصال بر استحکام اتصال به شدت اثر گذار هستند و مورد ارزیابی و اندازه‌گیری قرار



شکل ۴- (الف) ماکرو ساختار نمونه جوشکاری شده با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای زائده‌ای که نشان دهنده ویژگی‌های هندسی جوش است. (ب) ریز ساختار ناحیه همزده (ج) ساختار پلیسه‌ها (د) سطح مقطع از نمونه

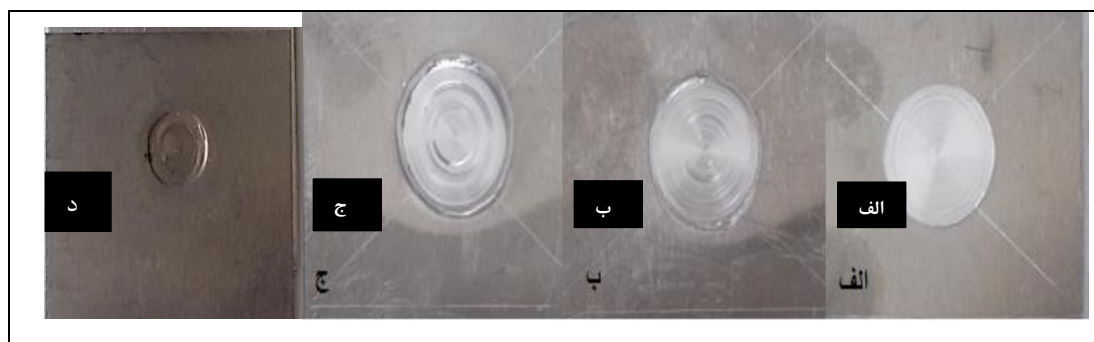
جوشکاری شده با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولی [۱۰]

طور مثال عمق ناحیه همزده در قطر شانه ثابت ۱۶ میلی متر و زمان نگهداری ۶ و ۱۲ و ۱۸ ثانیه به ترتیب برابر با ۷۵۰، ۸۱۰ و ۸۷۵ میکرو متر است. پس از ورود ابزار چرخان به داخل ورق‌ها در اثر تولید گرمای اصطکاکی و تغییر شکل پلاستیکی ناشی از چرخش ابزار ناحیه همزده‌ای که دارای ساختار دانه ریز تبلور مجدد یافته است، در لبه‌های جوش که سرعت خطی ابزار بالاتر از ناحیه مرکزی است، بیش‌تر تغییر شکل یافته است. افزایش زمان نگهداری ابزار، منجر به افزایش گرمای اصطکاکی و تغییر شکل از فلز پایه شده که در نتیجه منجر به افزایش عمق ناحیه همزده شده است. نتایج مشابه در گزارش آقای Sun و همکارانش بیان شده است [۲۵]. همچنین افزایش قطر شانه ابزار نیز سبب افزایش عمق ناحیه همزده و نیز افزایش مساحت اتصال است. در زمان یکسان ۱۸ ثانیه با افزایش قطر شانه ابزار عمق ناحیه همزده برای قطر شانه‌های ۱۴ و ۱۶ و ۱۸ میلی متر به ترتیب برابر با ۸۰۰، ۸۷۵ و ۱۱۱۰ میکرو متر است. دلیل این امر را می‌توان به تغییر سرعت خطی ابزار نسبت داد.

در قطر شانه ۱۸ میلی متر مقداری بالا آمدگی برای ورق بالا در اثر انبساط ناشی از گرم شدن مواد مشاهده می‌شود. برای تمامی نمونه‌ها سطح پشتی از جوش مشابه و حفره‌ای با قطر و عمقی برابر با قطر و ارتفاع زائده به کار گرفته شده زیر ورق‌ها مشاهده می‌شود. عمق و قطر فرورفتگی ایجاد شده در این روش تقریباً برابر با عمق ایجاد شده ناشی از فشار الکتروود در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای می‌باشد و از آنجا که این جوش در صنعت خودروسازی به طور گسترده استفاده می‌شود، انتظار می‌رود این روش نیز از نظر ظاهری مشکلی در مورد فرایندهایی نظیر رنگ کاری ایجاد نشود. با توجه به نتایج حاصله می‌توان چنین نتیجه گرفت که تغییر پارامترهای فرآیند فقط روی سطح بالایی از جوش تأثیر گذار است.

ماکرو ساختار

شکل ۷ اثر زمان نگهداری و قطر شانه ابزار بر ماکرو ساختار از نمونه‌ها و شکل ۸ اثر این پارامترها بر عمق ناحیه همزده را نشان می‌دهند. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، تغییر زمان نگهداری و قطر شانه ابزار عمق و عرض از ناحیه همزده را تغییر می‌دهد. به



شکل ۵- اثر زمان نگهداری ابزار در نمونه‌هایی با قطر شانه ثابت ۱۶ میلی متر و زمان‌های متفاوت سطح بالا (الف) ۶ ثانیه، (ب) ۱۲ ثانیه، (ج) ۱۸ ثانیه، (د) سطح پایین از اتصال

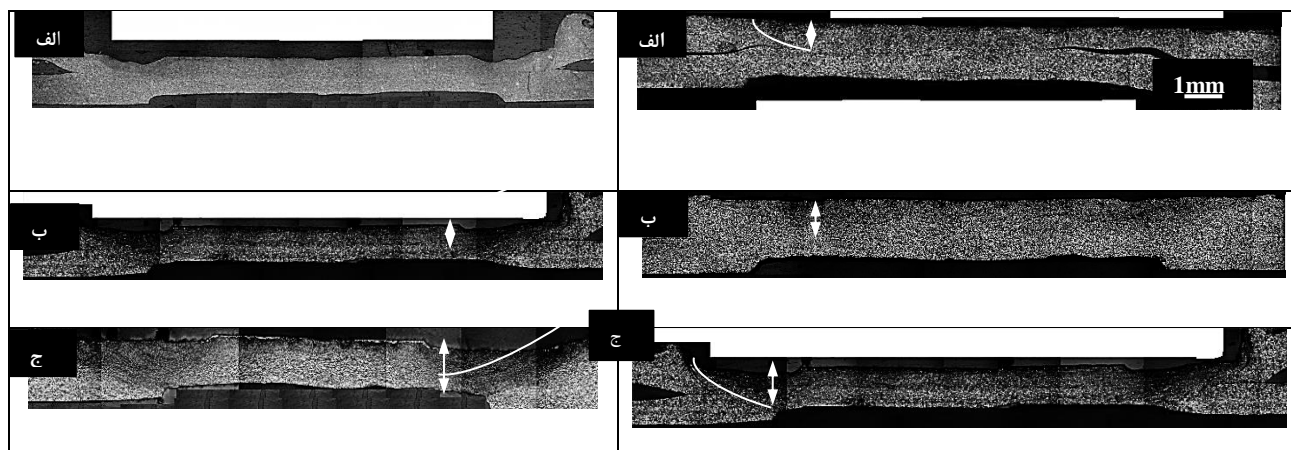


شکل ۶- اثر قطر شانه ابزار بر سطح ظاهری از جوش در زمان یکسان ۱۲ ثانیه و (الف) قطر ۱۴ (ب) قطر ۱۶ (ج) قطر ۱۸ میلی متر

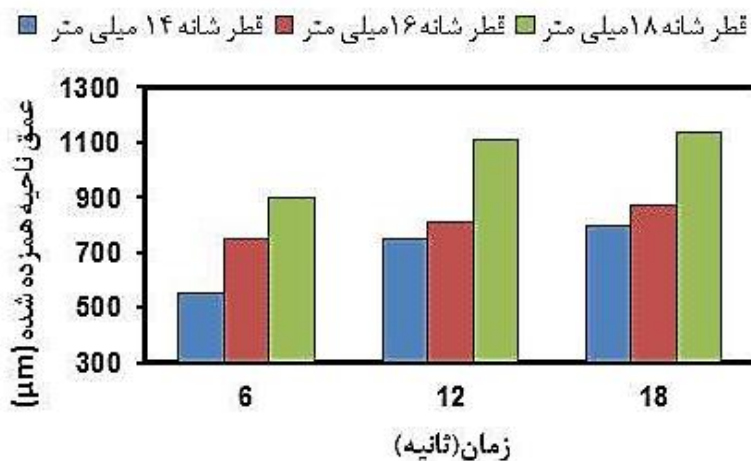
آلومینیم میزان عمق ناحیه همزده شده افزایش می‌یابد، با افزایش میزان عمق ناحیه همزده شده ضخامت ناحیه اتصال کاهش می‌یابد (شکل ۷).

همچنین شکل ۱۰ تاثیر زمان نگهداری و قطر شانه ابزار بر ضخامت ورق بالا را نشان می‌دهد. براساس شکل ۱۰ افزایش در هر دو پارامتر، سبب کاهش در ضخامت شده است. این کاهش ضخامت را می‌توان به افزایش گرمای ورودی و در نتیجه افزایش دما نسبت داد. افزایش دما نرم‌شدگی و تسهیل حرکت مواد را به دنبال دارد که در نتیجه آن نیروی برشی وارد بر مواد کاهش یافته و با انتقال مواد نرم شده به لبه‌های اتصال به شکل پلیسه، سبب کاهش ضخامت اتصال است. یکی از عیوبی که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای ایجاد می‌شود، عیب هندسی قلاب (هوک) است. هوک در حقیقت یک اتصال ضعیف متالوگرافی بین دو ورق است که هندسه آن به طور قابل توجهی بر استحکام و وضعیت شکست اثر گذار است. شکل ۱۱ هندسه هوک برای نمونه با زمان ۱۲ ثانیه و قطر شانه ۱۴ میلی‌متر را نشان می‌دهد.

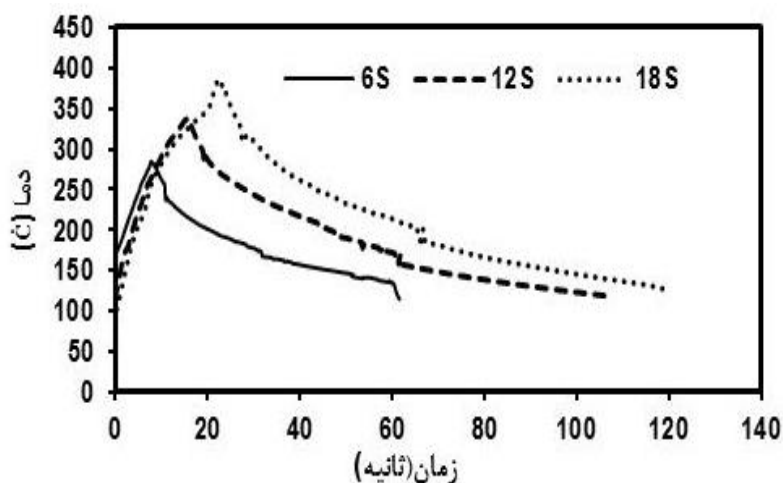
به عبارت دیگر وقتی ابزار در حال چرخش است، لبه‌های ابزار نسبت به مرکز از سرعت خطی بالاتری برخوردار است و هرچه قطر شانه ابزار افزایش می‌یابد. سرعت خطی در فاصله بیشتری نسبت به مرکز افزایش می‌یابد و این افزایش سرعت خطی همزدگی بیش‌تر مواد و افزایش عمق ناحیه همزده را به دنبال دارد. از طرف دیگر، نیز تغییرات هندسی مشاهده شده را می‌توان به تغییرات دمایی فرایند نسبت داد. شکل ۹ پروفیل‌های دما برای نمونه‌هایی با قطر شانه ابزار ۱۶ میلی‌متر و زمان نگهداری ابزار متفاوت را نشان داده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، پروفیل‌های دمایی در اثر چرخش ابزار و تولید گرمای اصطکاکی ایجاد شده است. با توجه به پروفیل ارائه شده با افزایش زمان نگهداری ابزار، بیشینه دمای ایجاد شده و نیز زمان ماندن در دمای بالا افزایش یافته است. افزایش دما به معنی گرمای اصطکاکی بیش‌تر است و این گرما سبب می‌شود که حجم مواد خمیری شده افزایش یابد که با قرار گرفتن تحت فرآیند تبلور مجدد ناحیه همزده بزرگتری تولید می‌شود. در حقیقت می‌توان گفت با افزایش دما ناحیه جوش و نزدیک شدن به دمایی ذوب



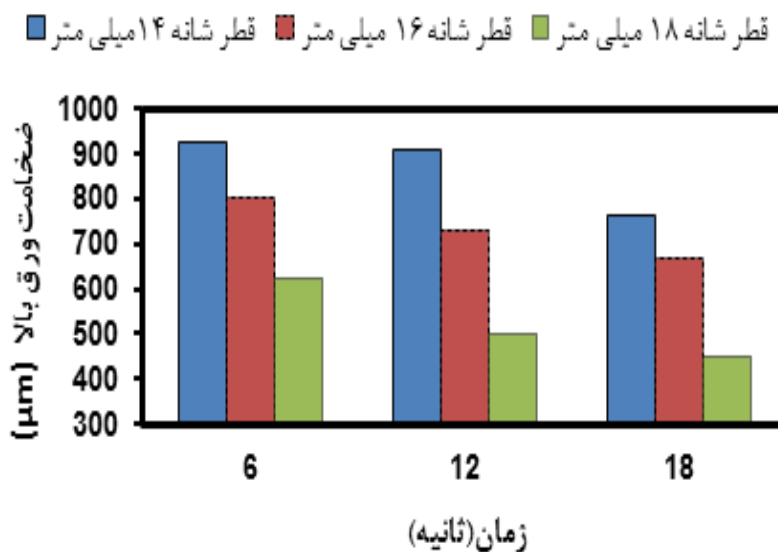
شکل ۷ - اثر زمان نگهداری ابزار بر عمق ناحیه همزده در قطر شانه ابزار ۱۶ میلی‌متر و زمان (الف) ۶، (ب) ۱۲، (ج) ۱۸ ثانیه (سمت راست) اثر قطر شانه ابزار بر عمق ناحیه همزده و ضخامت اتصال در زمان یکسان ۱۸ ثانیه قطر شانه ابزار (الف) ۱۴ (ب) ۱۶ (ج) ۱۸ میلی‌متر (سمت چپ)



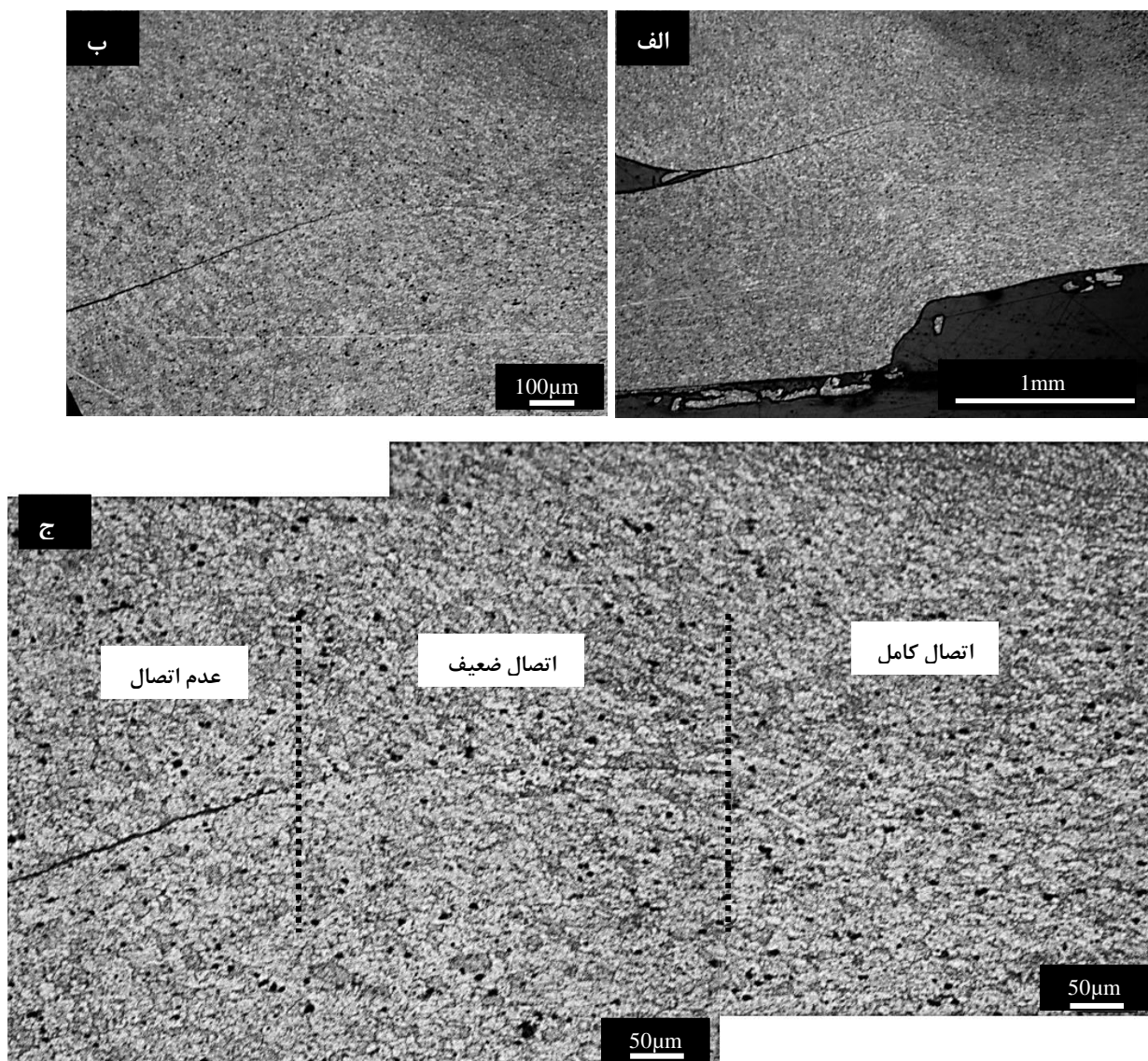
شکل ۸- اثر زمان نگهداری و قطر شانه ابزار بر عمق ناحیه همزده شده



شکل ۹- تغییرات دمایی در قطر شانه ابزار ۱۶ میلی متر و زمان نگهداری ابزار متفاوت



شکل ۱۰- ضخامت ورق بالا در قطر شانه ابزار و زمان نگهداری ابزار متفاوت



شکل ۱۱- (الف) هندسه هوک در نمونه با قطر شانه ۱۴ میلی متر و زمان ۱۲ ثانیه (ب) بزرگنمایی بالاتر از ناحیه مشخص شده در الف (ج) شکل ب در بزرگنمایی بالاتر

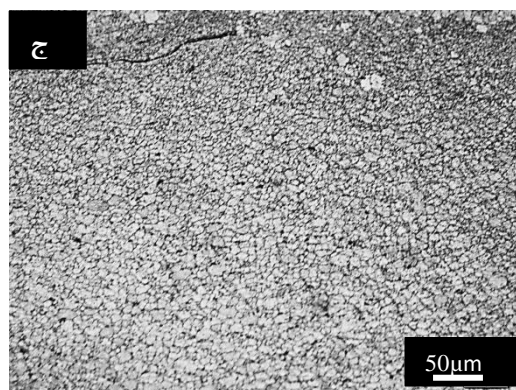
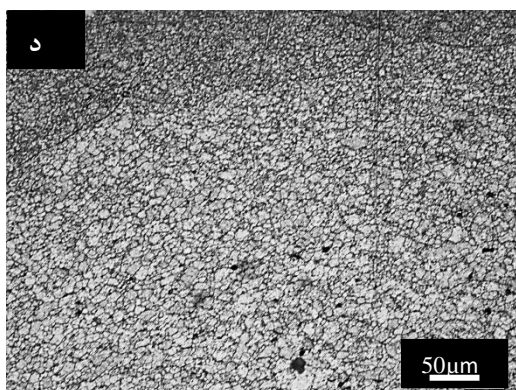
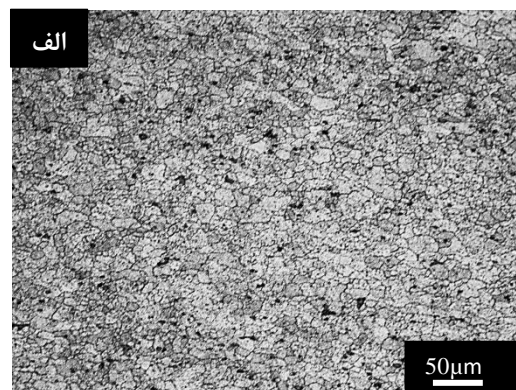
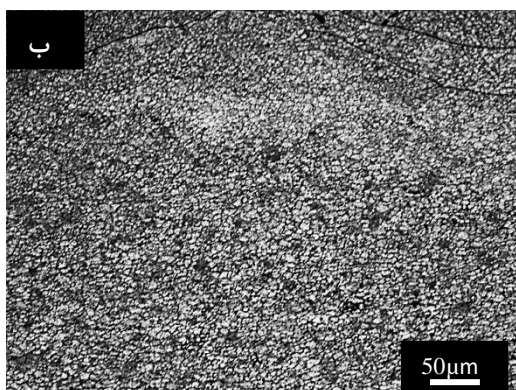
ریز ساختار

ابزار است. همان گونه که در شکل ۹ نشان داده شده است، در نمونه با قطر شانه ۱۶ میلی متر وقتی زمان نگهداری ابزار از ۶ به ۱۲ ثانیه افزایش می یابد. دما از 284°C به 338°C افزایش یافته و نیز زمان ماندن در دمای بالا نیز افزایش می یابد که هر دو عوامل موثر در رشد دانه محسوب می شوند. در تمامی نمونه ها اندازه دانه با روند مشابهی تغییر کرده است. اندازه دانه همزده شده برای تمام نمونه ها در جدول شماره ۲ آورده شده است. ذکر این نکته ضروری است که در هر قطر شانه ابزار با افزایش

تغییر پارامترهای جوشکاری منجر به تغییر دما، کرنش و نرخ کرنش می شود که از جمله عوامل اثر گذار در تغییرات ریز ساختاری هستند. شکل ۱۲ ریز ساختار ناحیه همزده برای نمونه هایی با زمان نگهداری ابزار متفاوت را نشان می دهد. همان گونه که در شکل قابل مشاهده است، با افزایش زمان نگهداری ابزار اندازه دانه افزایش یافته است و محاسبه اندازه دانه نیز مقادیر ۶، ۹ و ۱۲ میکرومتر را به ترتیب برای زمان های ۶، ۱۲ و ۱۸ ثانیه نشان داد. دلیل افزایش اندازه دانه براساس پروفیل های دما، افزایش دما با افزایش زمان نگهداری

دما و نرخ کرنش افزایش می‌یابد که اندازه دانه تبلور مجدد وابسته به غالب بودن هر عامل تغییر می‌کند. با افزایش قطر ابزار به ۱۸ ثانیه هرچند دما بالاتر است؛ اما نرخ کرنش نیز به شدت بالا رفته که سبب ریز شدن اندازه دانه تبلور مجدد است.

زمان نگهداری اندازه دانه افزایش یافته است. همچنین با افزایش قطر شانه ابزار از ۱۴ به ۱۶ اندازه دانه افزایش یافته است که دلیل آن مربوط به افزایش دما است؛ اما با افزایش قطر شانه ابزار به ۱۸ میلی متر اندازه دانه کاهش یافته است. در توضیح این مساله باید گفت که با افزایش قطر شانه ابزار دو عامل مهم در فرآیند تبلور مجدد یعنی



شکل ۱۲- (الف) ریز ساختار فلز پایه، تصویر ناحیه همزده برای ابزار با قطر ۱۶ میلی متر و زمان نگهداری ابزار متفاوت (ب) ۶ثانیه (ج) ۱۲ثانیه (د) ۱۸ثانیه

جدول ۲- اندازه دانه ناحیه همزده شده برای نمونه‌هایی با پارامترهای مختلف.

پارامترها	۶ثانیه	۱۲ثانیه	۱۸ثانیه
قطر ابزار ۱۴	۵/۵	۷	۱۱
قطر ابزار ۱۶	۶	۹	۱۲
قطر ابزار ۱۸	۵	۷	۱۰

می‌شود، سطح استحکام بالاتر است. بیان این نکته قابل ذکر است که در نمونه‌هایی با قطر ابزار ۱۸ میلی متر هر چند عمق ناحیه همزده بالا و اندازه دانه به جهت نرخ کرنش بالا ریز است؛ اما به سبب فشار بالایی که از طرف ابزار وارد می‌شود، میکرو ترک‌هایی در ساختار وجود دارد که سبب می‌شود سطح استحکام پایین باشد.

تغییرات سختی

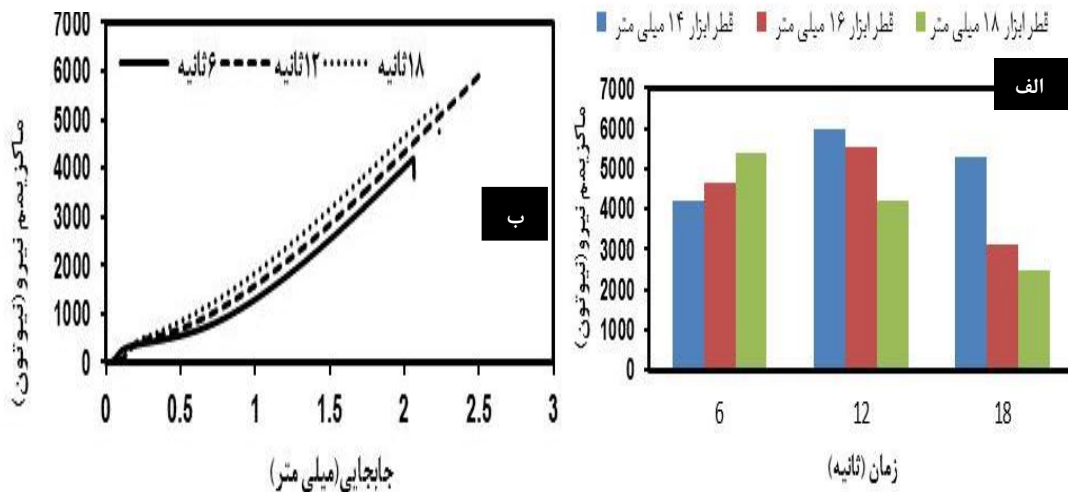
به منظور بررسی تاثیرات ریزساختاری از جمله اندازه دانه و کسر حجمی رسوبات استحکام دهنده بر خواص مکانیکی با توجه به تغییرات دمایی در حین اتصال و میزان رشد و انحلال رسوبات در گستره جوش، مناسب‌ترین روش، اندازه‌گیری تغییرات سختی می‌باشد. شکل ۱۴ تغییرات سختی برای نمونه با قطر ابزار ۱۴ و زمان ۱۸ ثانیه را نشان می‌دهد. نمودار سختی از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول افزایش سختی از قسمت مرکز نمونه تا لبه ابزار و بخش دوم مربوط به کاهش سختی با فاصله گرفتن از لبه جوش (ناحیه همزده شده) و رسیدن به ناحیه متأثر از حرارت و فلز پایه است. تغییرات سختی را می‌توان به تغییرات اندازه دانه و نیز اندازه و توزیع رسوبات در نواحی مختلف جوش مرتبط دانست. در قسمت اول وجود گرادیان کاهشی اندازه دانه از قسمت مرکز به سمت لبه جوش براساس تئوری هال-پیچ منجر به افزایش سختی می‌شود. تغییرات سرعت خطی ابزار از مرکز به سمت لبه ابزار، سبب تغییر در میزان کرنش از مرکز جوش به سمت لبه اتصال شده که این عامل، تغییرات ریز ساختاری از A تا C در شکل ۱۴ را سبب می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تغییر نرخ تبلور مجدد، باعث ریز شدن دانه‌ها از قسمت مرکز نمونه به سمت لبه می‌شود که افزایش سختی را به دنبال دارد؛ اما با فاصله گرفتن از لبه اتصال و وارد شدن به ناحیه متأثر از حرارت (نقطه D) اندازه دانه با توجه به نبود کرنش افزایش می‌یابد، انتظار می‌رود مطابق اصول کلاسیک رسوب گذاری آلیاژهای رسوب سخت، اندازه رسوبات در ناحیه متأثر از حرارت با توجه به قرارگیری فلز در دمای بالا افزایش یافته باشد که خود عاملی برای کاهش سختی

خواص مکانیکی

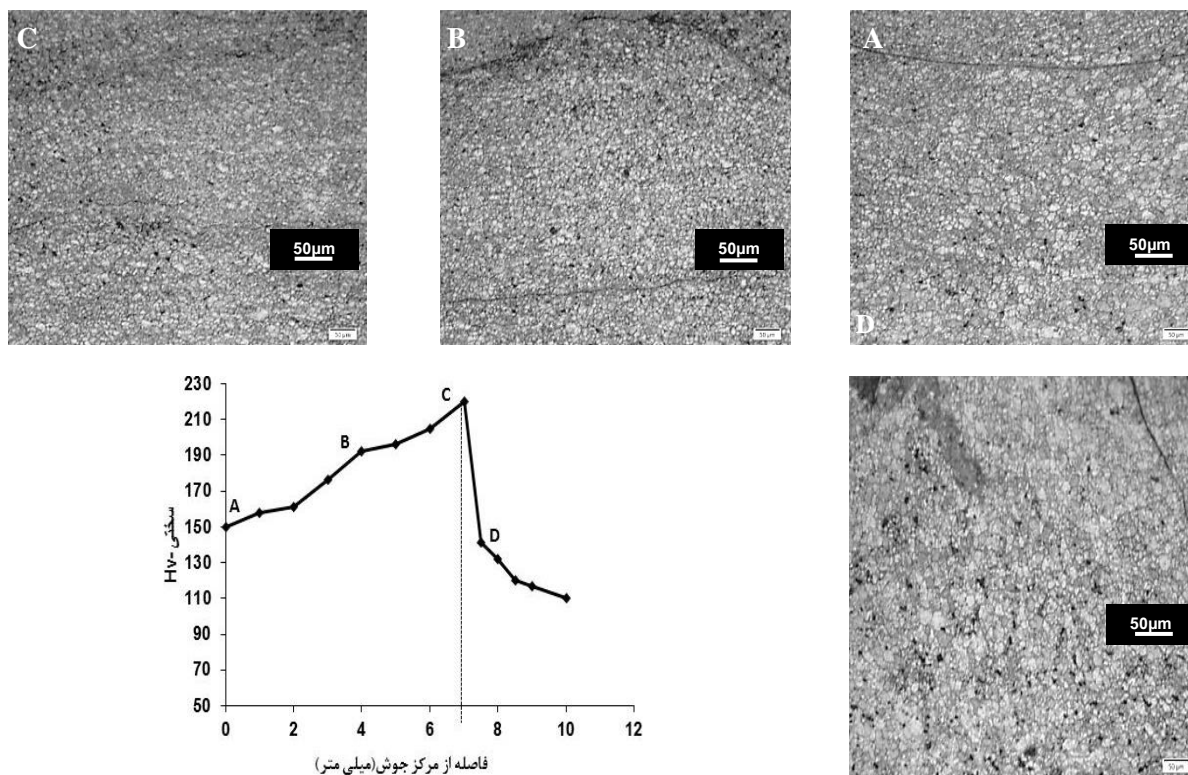
شکل ۱۳- الف اثر قطر شانه و زمان نگهداری ابزار بر استحکام اتصال را نشان می‌دهد. براساس دیاگرام نیرو-جابجایی حاصل از آزمون کشش- برش شکل ۱۳- ب حداکثر نیروی شکست برابر با ۶۰۱۹ نیوتون در نمونه با قطر شانه ۱۴ میلی متر و زمان ۱۲ ثانیه می‌باشد. افزایش سطح اتصال و عمق ناحیه همزده افزایش استحکام و کاهش ضخامت ورق بالا کاهش استحکام را سبب می‌شوند. در یک قطر شانه ابزار ثابت با افزایش زمان هر چند سطح اتصال زیاد می‌شود؛ اما ضخامت اتصال کاهش می‌یابد. در نمونه‌هایی با قطر شانه ۱۴ و ۱۶ میلی متر افزایش زمان از ۶ به ۱۲ ثانیه به سبب افزایش موثر سطح اتصال و عمق ناحیه همزده سطح استحکام افزایش یافته است؛ اما با افزایش زمان به ۱۸ ثانیه کاهش سطح استحکام را شاهد هستیم که در نتیجه غلبه کاهش ضخامت بر افزایش سطح اتصال است؛ اما در نمونه‌هایی با قطر شانه ۱۸ میلی متر به علت بالا بودن گرما، از ابتدا با افزایش زمان سطح استحکام کاهش می‌یابد که دلیل این موضوع مربوط به غلبه اثر کاهش ضخامت بر افزایش سطح موثر و نیز عیوبی نظیر میکرو ترک‌ها به سبب فشار بالایی که ابزار با قطر شانه ۱۸ میلی متر وارد می‌کند در ناحیه جوش است. تفسیرهایی مشابه را می‌توان در مورد اثر افزایش قطر شانه ابزار بیان کرد. افزایش قطر شانه ابزار افزایش سطح اتصال و عمق ناحیه همزده و نیز کاهش ضخامت اتصال را سبب می‌شود که به ترتیب افزایش یافته و کاهنده استحکام می‌باشند [۲۶]. در زمان یکسان ۶ ثانیه با افزایش قطر ابزار سطح بیشتری از مواد تحت فرآیند همزدن قرار گرفته که افزایش سطح اتصال را به دنبال دارد، از طرفی دمای بالاتر با افزایش قطر ابزار، سبب افزایش عمق ناحیه همزده می‌شود که هر دو عوامل افزایش دهنده استحکام هستند پس سطح استحکام افزایش می‌یابد؛ اما در نمونه‌های ۱۲ و ۱۸ ثانیه به علت بالا بودن دما، با افزایش قطر شانه اثر کاهش ضخامت بیش‌تر غالب بوده و منجر به کاهش استحکام شده است. در تمامی نمونه‌ها سطح استحکام به ریز ساختار نمونه و هندسه هوک نیز وابسته است. هر چقدر که ساختار ریزدانه‌تر و عاری از عیوبی نظیر ترک باشد، با توجه به اینکه در این حالت رشد ترک سخت‌تر بوده و کندتر انجام

ویکرز است. این درحالی است که سختی در مرکز اتصال (نقطه A) با اندازه دانه ۱۵ میکرومتر برابر با ۱۵۰ ویکرز است.

نسبت به ناحیه همزده می‌باشد [۱۰]. براساس نمودار تغییرات سختی بیش‌ترین میکرو سختی در لبه جوش (نقطه C) با اندازه دانه ۱۱ میکرومتر و برابر با ۲۲۰



شکل ۱۳- (الف) اثر قطر شانه ابزار و زمان نگهداری ابزار بر استحکام اتصال، (ب) دیاگرام نیرو-جابجایی حاصل از تست کشش-برش

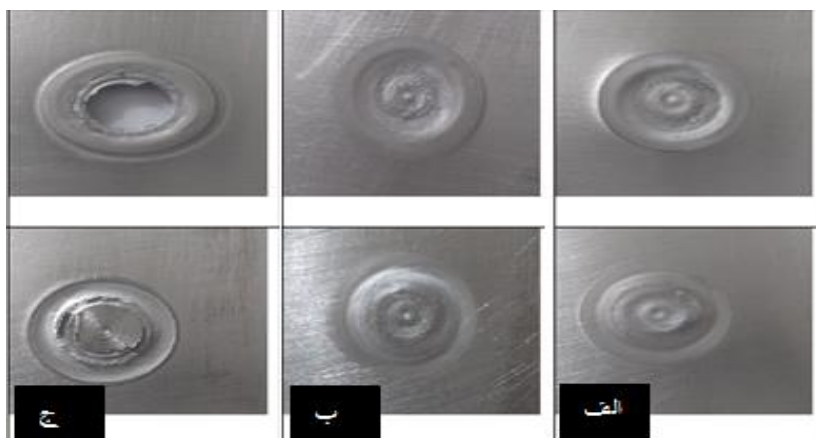


شکل ۱۴- تغییرات سختی برای نمونه با قطر ابزار ۱۴ و زمان ۱۸ ثانیه

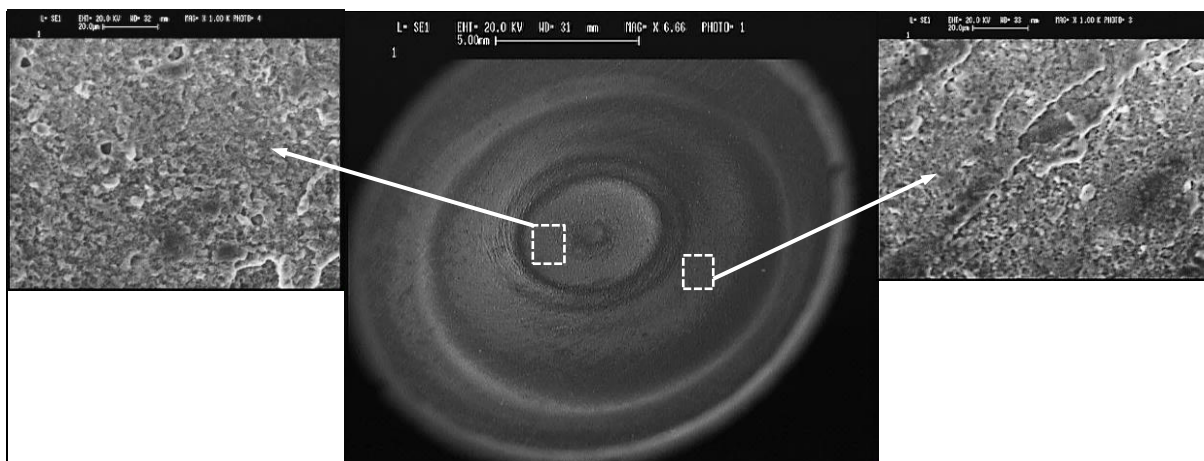
رفتار شکست

محیطی شکسته است و بخشی از ورق بالا بر روی ورق پایین باقی مانده است. از جمله عوامل موثر در شکست محیطی ضخامت ورق بالا است. طبق نتایج گزارش شده در نمونه با زمان ۱۸ ثانیه ضخامت ورق بالا نسبت به دو نمونه دیگر کاهش بیشتری نشان داده است، ضمن اینکه در این نمونه عمق ناحیه همزده بالا بوده و به ورق پایین رسیده است این عوامل در کنار هم سبب می‌شود که وقتی ترک از فصل مشترک شروع می‌شود در برخورد با ناحیه همزده که دارای ساختار ریز دانه تری نسبت به فلز پایه است به سمت ورق بالا رشد کند که سبب شکست محیطی است. در نمونه با شکست محیطی ابتدا شکست به صورت فصل مشترک رشد می‌کند؛ اما با رسیدن به ناحیه کاهش ضخامت ورق بالا ترک به سمت ورق بالا با ساختار فلز پایه که اندازه دانه بزرگتری دارد، رشد کرده و در نهایت شکست محیطی رخ داده است. براساس شکل ۱۷، در شکست محیطی، شروع شکست در ابتدا به صورت فصل مشترکی است که حضور دیپل‌ها تایید کننده این مطلب است سپس پدیده گلویی شدن و اعمال تنش کششی بر اتصال است و در نهایت باقی ماندن بخشی از ورق بالا روی ورق پایین رخ می‌دهد. مکانیزم شکست مشابه توسط پایدار و همکارانش گزارش شده است [۲۷] که ابتدا شکست به حالت فصل مشترکی شروع می‌شود و پس از رسیدن به ناحیه همزده که ساختار ریز دانه تری نسبت به فلز پایه دارد و به همین جهت از سختی بالاتری برخوردار است، مسیر رشد ترک تغییر کرده و از طریق ورق بالا که ضخامت آن به طور قابل توجهی کاهش یافته است ادامه می‌یابد و منجر به شکست محیطی است.

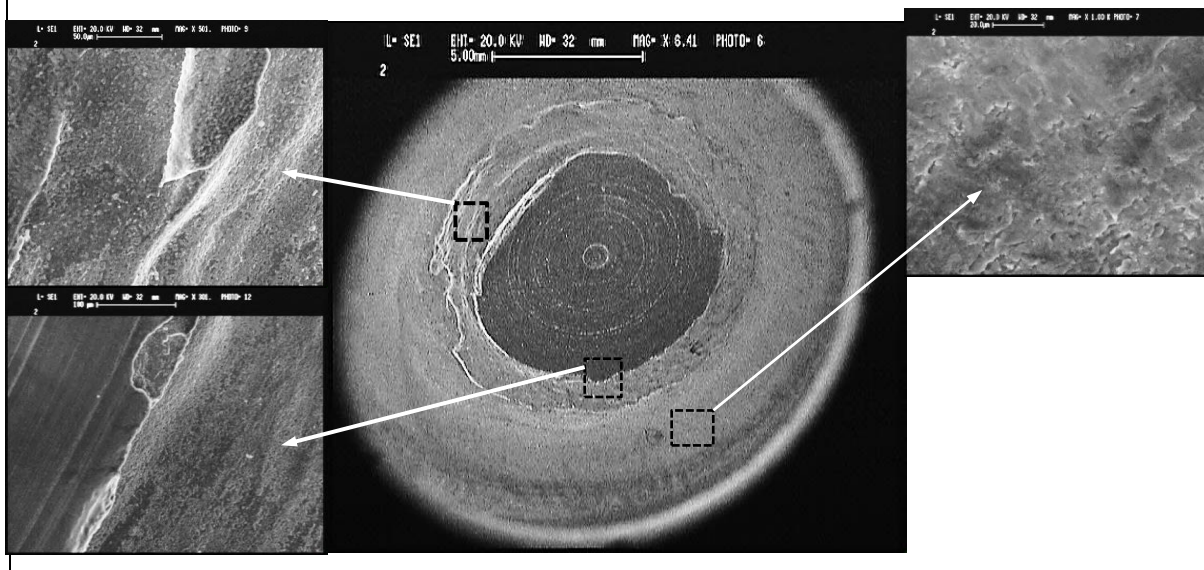
جوش‌های اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای به دو حالت محیطی و فصل مشترکی دچار شکست می‌شوند [۲۵]. در نمونه‌های مورد بررسی دو نمونه زمان ۱۸ ثانیه با قطر شانه ۱۴ و ۱۶ میلی‌متر به صورت محیطی شکسته است در حالی که سایر نمونه‌ها به صورت فصل مشترکی دچار شکست شده است. در شکل ۱۵ وضعیت شکست نمونه-هایی با قطر شانه ابزار ۱۴ میلی‌متر و زمان‌های متفاوت نشان داده شده است. شکست نمونه‌های با زمان ۶ و ۱۲ ثانیه به صورت فصل مشترکی بوده که در آن از فصل مشترک ورق بالا و پایین شکست اتفاق افتاده که در شکل نیز قابل مشاهده است. عوامل اثر گذار در شکست فصل مشترکی عمق ناحیه همزده، طول اتصال، اندازه دانه فصل مشترک و هندسه هوک است. در حین آزمون کشش ترک همواره از فصل مشترک دو ورق شروع شده از طریق مسیر هوک در ورق پایین و در فصل مشترک ناحیه همزده، ناحیه متأثر از حرارت و تغییر شکل، ترک رشد کرده و در نهایت شکست فصل مشترکی رخ می‌دهد [۲۷]. شکل ۱۱ نشان دهنده هندسه هوک در نمونه با زمان ۱۲ ثانیه و قطر شانه ۱۴ میلی‌متر است. مطابق با شکل مسیر هوک در فصل مشترک ناحیه همزده و ناحیه متأثر از حرارت-تغییر شکل است که سبب شکست فصل مشترکی شده است. تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست فصل مشترکی در شکل ۱۶ آورده شده است که وجود دیپل‌های کمی کشیده شده در تصاویر نشان دهنده اعمال تنش برشی است که از عوامل اثر گذار در شکست فصل مشترکی است. نمونه با زمان ۱۸ ثانیه به صورت



شکل ۱۵- وضعیت شکست نمونه هایی با قطر شانه ابزار ۱۴ میلی‌متر و زمان نگهداری ابزار متفاوت (الف) ۶ ثانیه، (ب) ۱۲ ثانیه، (ج) ۱۸ ثانیه



شکل ۱۶- (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست فصل مشترکی نمونه با قطر ابزار ۱۴ و زمان ۱۲ ثانیه



شکل ۱۷- (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست محیطی

۲-افزایش زمان نگهداری ابزار و قطر شانه ابزار، سبب افزایش عمق ناحیه همزده و مساحت متصل شده است که دلیل این امر را می‌توان به افزایش تولید گرمای اصطکاکی و افزایش شکل پذیری نسبت داد.

۳-با افزایش زمان نگهداری ابزار و قطر شانه ابزار، ضخامت ورق بالا و به موجب آن ضخامت اتصال کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر در زمان یکسان ۶ ثانیه با افزایش قطر شانه ابزار از ۱۴ به ۱۶ میلی متر ضخامت ورق بالا از ۹۰۰ به ۸۰۰ میکرومتر کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل حرکت مواد نرم شده به لبه‌های اتصال در اثر چرخش ابزار است.

۴-سطح اتصال، عمق ناحیه همزده، ضخامت ورق بالا، هندسه هوک، اندازه دانه و ذوب موضعی از جمله عوامل

نتیجه‌گیری

تاثیر زمان نگهداری و قطر شانه ابزار بر خواص مکانیکی و وضعیت شکست جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای زائده‌ای آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، خلاصه نتایج حاصله به شرح ذیل می‌باشد:

۱-افزایش زمان نگهداری ابزار از ۱۲ به ۱۸ ثانیه و نیز قطر شانه ابزار از ۱۲ به ۱۸ میلی متر، سبب تولید پلیسه در لبه‌های اتصال شده است؛ اما روی سطح پایین جوش تاثیر ندارد.

۷- میکرو سختی در اتصالات با اندازه دانه تغییر می‌کند و وجود گرادیان اندازه دانه از مرکز به سمت لبه اتصال، سبب تفاوت سختی در این ناحیه شده است. مرکز نمونه با اندازه دانه ۱۵ میکرو متر سختی ۱۵۰ و لبه نمونه با اندازه دانه ۱۱ میکرو متر سختی ۲۲۰ را نشان داد.

۸- دو نوع وضعیت شکست متفاوت، شکست فصل مشترکی و شکست محیطی در نمونه‌ها مشاهده می‌شود. ضخامت ورق بالا مهم‌ترین عامل اثر گذار در تسهیل شکست محیطی است.

References:

- 1- Q. Chu, X. Yang, W. Li, and Y. Li, "Microstructure and mechanical behaviour of pinless friction stir spot welded AA2198 joints," vol. 21, no. 3, pp. 164–170, 2016.
- 2- M. Fujimoto, S. Koga, N. Abe, Y. S. Sato, and H. Kokawa, "Microstructural analysis of stir zone of Al alloy produced by friction stir spot welding," vol. 13, no. 7, pp. 663–670, 2008.
- 3- Z. Zhang, X. Yang, J. Zhang, G. Zhou, X. Xu, and B. Zou, "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy," Mater. Des., vol. 32, no. 8–9, pp. 4461–4470, 2011.
- 4- M. Paidar, A. Khodabandeh, H. Najafi, and A. S. Rouh-aghdam, "Effects of the tool rotational speed and shoulder penetration depth on mechanical properties and failure modes of friction stir spot welds of aluminum 2024-T3 sheets," J. Mech. Sci. Technol., vol. 28, no. 12, pp. 4893–4898, 2014.
- 5- A. Gerlich, P. Su, and T. H. North, "Tool penetration during friction stir spot

اثر گذار بر خواص مکانیکی هستند که با تغییر پارامترهای فرآیند تغییر می‌کند.

۵- اندازه دانه در ناحیه همزده با افزایش زمان نگهداری و نیز قطر شانه ابزار به سبب افزایش دما، افزایش می‌یابد. به طور مثال در قطر شانه ۱۶ میلی متر با افزایش زمان از ۶ به ۱۲ ثانیه اندازه دانه از ۶ به ۹ میکرومتر افزایش می‌یابد.

۶- به طور کلی با افزایش زمان و قطر شانه ابزار، میزان سطح اتصال و ضخامت ورق بالا تغییر می‌کند و در نتیجه تغییر این عوامل مهم به همراه سایر عوامل موثر، استحکام تغییر می‌کند. چگونگی تغییرات استحکام وابسته به تغییرات عامل غالب می‌باشد.

welding of Al and Mg alloys," J. Mater. Sci., vol. 40, no. 24, pp. 6473–6481, 2005.

6- D. Zhang and T. Shibayanagi, "Material flow during friction stir spot welding of dissimilar Al2024 / Al materials," vol. 31, no. 9, pp. 1077–1087, 2015.

۷ - بررسی استعداد به خوردگی مرز دانه ای مقطع جوشکاری شده آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی. فرهاد غروی، کامران امینی و فیروز فدائی. مجله مواد نوین جلد ۵ شماره ۳ سال ۱۳۹۴.

8- G. Buffa, P. Fanelli, L. Fratini, and F. Vivio, "Influence of joint geometry on micro and macro mechanical properties of friction stir spot welded joints," Procedia Eng., vol. 81, no. October, pp. 2086–2091, 2014.

9- N. Pathak, K. Bandyopadhyay, M. Sarangi, and S. K. Panda, "Microstructure and mechanical performance of friction stir spot-welded aluminum-5754 sheets," J. Mater. Eng. Perform., vol. 22, no. 1, pp. 131–144, 2013.

10- M. Paidar, A. Khodabandeh, H. Najafi, and A. S. Rouh-aghdam, "An investigation on mechanical and metallurgical properties of 2024-T3 aluminum alloy spot friction welds," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol.

- 80, no. 1–4, pp. 183–197, 2015.
- 11- R.Kartihikyan, V.Balasubramaian. Optimaization of Electrica Resistance Spot Welding and Comparasion with Friction Stir Spot Welding of AA2024 Aluminum Alloy joints.5th International Conference of Material Processing 2017.
- 12- W. Li, J. Li, Z. Zhang, D. Gao, W. Wang, and C. Dong, “Improving mechanical properties of pinless friction stir spot welded joints by eliminating hook defect,” *J. Mater.*, vol. 62, pp. 247–254, 2014.
- 13- Z.M.Su, R.Y.He,P.C.Lin. Fatigue of alclad AA2024 swept friction stir spot welds in cross tension specimens. Jornal pf Material Processing Technology 2016.
- 14- X. Song, L. Ke, L. Xing, F. Liu, and C. Huang, “Effect of plunge speeds on hook geometries and mechanical properties in friction stir spot welding of A6061-T6 sheets,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 71, no. 9–12, pp. 2003–2010, 2014.
- 15- Z. . Shen, Y. . Chen, J. S. C. . Hou, X. . Yang, and A. P. . Gerlich, “Influence of processing parameters on microstructure and mechanical performance of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium alloy,” *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 20, no. 1, pp. 48–57, 2015.
- 16- A. Gerlich, M. Yamamoto, and T. H. North, “Local melting and cracking in Al 7075-T6 and Al 2024-T3 friction stir spot welds,” vol. 12, no. 6, pp. 472–480, 2007.
- 17- D. Bakavos and P. B. Prangnell, “Effect of reduced or zero pin length and anvil insulation on friction stir spot welding thin gauge 6111 automotive sheet,” vol. 14, no. 5, pp. 443–456, 2009.
- 18- M. De Leon and H. Shin, “Material flow behaviours during friction stir spot welding of lightweight alloys using pin and pinless tools,” vol. 00, no. 0, pp. 1–7, 2015.
- 19- Y. F. Sun, H. Fujii, N. Takaki, and Y. Okitsu, “Novel spot friction stir welding of 6061 and 5052 Al alloys,” vol. 16, no. 7, pp. 605–612, 2011.
- 20- S. Venukumar, B. Baby, S. Muthukumaran, and S. V. Kailas, “Microstructural and Mechanical Properties of Walking Friction Stir Spot Welded AA 6061-T6 Sheets,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 6, no. Icmipc, pp. 656–665, 2014.
- 21- C. D. Cox, B. T. Gibson, D. R. Delapp, A. M. Strauss, and G. E. Cook, “Technical paper A method for double-sided friction stir spot welding,” *J. Manuf. Process.*, vol. 16, no. 2, pp. 241–247, 2014.
- 22- F.Zarghani, S.M.Mosavizade. Effect of dwell time on the microstructure and mechanical properties of projection friction stir spot welded 2024Aluminium Alloy. Iran International Aluminum Conference IIAC 2016.
- 23- Zhengwei.Li,Yumei Yue,Shude Ji,Chai Peng,Ling Wang, "Optimal design of theread geometry and its performance in friction stir spot welding." *Materials and design*, vol 94,pp 368-376,2016.
- 24- Ashu Grag,.Anirban Bhattachaty."On lap shear strength of friction stir spot welded AA6061 alloy" Vol 26, pp 203-215,2017.
- 25- Y. F. Sun, H. Fujii, N. Takaki, and Y. Okitsu, “Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al alloy / steel joints prepared by a flat spot friction stir welding technique,” *Mater. Des.*, vol. 47, pp. 350–357, 2013.
- 26- M. K. Bilici and A. I. Yukler, “Effects of welding parameters on friction stir spot

welding of high density polyethylene sheets,” *Mater. Des.*, vol. 33, pp. 545–550, 2012.

27- M. Paidar, A. Khodabandeh, M. L. Sarab, and M. Taheri, “Effect of welding parameters (plunge depths of shoulder, pin geometry, and tool rotational speed) on the failure mode and stir zone characteristics of friction stir spot welded aluminum 2024-T3 sheets,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 11, pp. 4639–4644, 2015.

