

## جوشکاری همزن اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای زائده ای: خواص مکانیکی و ریز ساختاری آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

امید زارعی<sup>۱</sup>، سید مصطفی موسوی زاده<sup>۲</sup>، فاطمه زرقانی<sup>۳\*</sup>، حامد زارعی<sup>۱</sup>  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۰۱، ش.ص: ۶۸-۵۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۰)

### چکیده

با کاربرد موفقیت آمیز روش جوشکاری همزن اصطکاکی اغتشاشی زائده ای برای آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ و فولاد ساده کربنی با ضخامت ۱ میلی متر این پژوهش برای جوشکاری ورق های آلومینیوم ۶۰۶۱ با ضخامت ۱ میلی متر به کار گرفته شد. اثر زمان نگهداری ابزار (۴، ۶ و ۹ ثانیه) و عمق فروروی ابزار (۰/۱، ۰/۱۴ و ۰/۱۸ میلی متر) بر خواص مکانیکی و ریزساختاری مورد بحث و ارزیابی قرار گرفته است. نتایج سطح ظاهری نشان داد که به کارگیری این روش، سبب حذف کامل فرورفتگی در سطح نمونه ها شده و سطح جوش پس از فرآیند کاملا صاف است. تصاویر ریزساختاری و نتایج مکانیکی بیانگر این است که ناحیه جوش با ساختار تبلور مجدد دینامیکی دارای سختی و استحکام بالاتری نسبت به فلز پایه است. افزایش در پارامترها، سبب افزایش عمق ناحیه همزده و نیز طول اتصال می شود که دلیل آن تولید گرمای اصطکاکی و نیز همزدگی بیش تر مواد است. با افزایش زمان نگهداری از ۴ به ۸ در عمق فروروی ثابت ۰/۱۸ میلی متر عمق ناحیه همزده شده از ۷۵۰ به ۹۰۰ میکرومتر افزایش می یابد. بیشینه استحکام جوش در این پژوهش برابر با ۴۴۹۵/۵ نیوتن است. این نمونه به دلیل مود شکست محیطی و اتصال مناسب در فصل مشترک دارای بیشینه نیروی شکست بالایی است. مشاهدات سطح شکست وجود هر دو نوع وضعیت شکست در جوشکاری نقطه ای شامل وضعیت فصل مشترکی و محیطی را نشان داد.

**واژه های کلیدی:** آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱، جوشکاری همزن اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای زائده ای، میکروساختار، خواص مکانیکی.

<sup>۱</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران  
<sup>۲</sup> - استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران  
<sup>۳</sup> - دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران  
\*نویسنده مسئول مقاله: zarghani\_fr2711@yahoo.com

## پیشگفتار

امروزه مساله کاهش وزن به منظور کاهش مصرف سوخت و راندمان بالاتر یک چالش اساسی و مهم در صنایع حمل و نقل به ویژه خودرو سازی و هوافضا است. مهم ترین اساسی ترین پیشنهادها جهت کاهش وزن خودروها جایگزین کردن قطعات سنگین فولادی با آلیاژهای سبکی مانند آلومینیوم است [۲۱]. هر چند روش جوش نقطه ای مقاومتی به طور گسترده به عنوان روش اتصال نقطه ای برای اتصال ورق های نازک در صنایع خودرو سازی و هوا فضا استفاده می شود؛ اما بکارگیری این روش برای جوشکاری آلومینیوم به علت مقاومت الکتریکی پایین این آلیاژ و در نتیجه نیاز به جریان های زیاد برای ذوب موضعی آلیاژ با مشکلات و محدودیت هایی همراه می باشد [۳ و ۴]. در سال ۲۰۰۱ صنعت خودرو سازی روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای را با توجه به مصرف انرژی کم تر و هزینه تجهیزات کم تر به عنوان جایگزین جوشکاری مقاومتی نقطه ای<sup>۱</sup> (RSW) معرفی و به کار گرفت [۵]. روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای<sup>۲</sup> (FSSW) یک روش اتصال حالت جامد است که در آن یک ابزار با طراحی خاص به ورق بالا وارد شده و سپس در اثر چرخش ابزار و تولید گرمای اصطکاکی تغییر شکل پلاستیکی اتفاق افتاده و اتصال بین ورق بالا و پایین شکل می گیرد. شکل ۱ طرحواره ای از این فرآیند را نشان می دهد [۴]. از جمله مزایای این روش این است که به سبب ماهیت حالت جامد مشکلات متالورژیکی مانند ترک خوردگی انجمادی در جوش های حاصل از آن حذف شده ضمن اینکه به دلیل حرارت ورودی کم تر نسبت به روش های جوشکاری ذوبی تنش های باقیمانده و اعوجاج کم تر می شود [۶]. یا وجود تمام مزایای گفته شده برای این فرآیند؛ اما فرورفتگی باقی مانده روی سطح جوش بزرگ ترین عیب این فرآیند محسوب می شود. روش های متفاوتی نظیر روش پرسازی مجدد [۷]، روش قدم زدن [۸]، استفاده از ابزار بدون پین [۹] و استفاده از دو پاس فرآیند [۱۰] به منظور حذف یا کاهش اثر فرورفتگی به کار گرفته شده است. روی

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای آلیاژهای آلومینیوم و اثر پارامترهای فرآیند بر کیفیت اتصال تحقیقات زیادی انجام شده است. گرلیچ و همکاران [۱۱] اثر پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر نرخ کرنش را بررسی کرده و گزارش داده اند که سرعت چرخش مهم ترین پارامتر اثر گذار بر نرخ کرنش است. پایدار و همکاران اثر پارامترهای فرآیند بر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای آلومینیوم ۲۰۲۴ را مورد بررسی قرار داده و گزارش کرده اند که هر چند در برخی نمونه ها استحکام بالا است؛ اما سطح ظاهری تمام نمونه ها دارای فرورفتگی است [۱۲]. همچنین استحکام برشی و عمر خستگی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با روش پر کردن توسط ونکومر و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت. محققین بیان کرده اند که با اجرای این روش استحکام از روش معمول بالاتر و فرورفتگی ظاهری حذف شده است [۱۳]. روش پر کردن هر چند فرورفتگی را به طور کامل حذف می کند؛ اما بسیار پیچیده و زمان بر است. اما موسوی و همکاران روش جدیدی برای حذف فرورفتگی به عنوان روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای زائده ای را پیشنهاد داده اند که به طور موثری برای اتصال ورق های آلومینیوم ۲۰۲۴ مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴ و ۱۵]. شکل (۲) شماتیکی از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای زائده ای را نشان می دهد. این فرآیند دقیقا مشابه با روش معمول است؛ اما با این تفاوت که زیر ورق ها و درست در محل فروروی ابزار یک زائده با ابعاد استاندارد و بهینه شده قرار گرفته که جریان را از حالت فصل مشترکی خارج کرده و سبب شکل گیری اتصال موثر می شود. لازم به ذکر است که 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 می باشند. وقتی هندسه ابزار ثابت باشد، سرعت چرخش و زمان نگهداری ابزار پارامترهای اصلی این روش هستند [۱۶]. تاکنون چندین تحقیق در مورد اثر پارامترهای فرآیند بر خواص مکانیکی و متالورژیکی جوش های حاصل از روش اصطکاکی نقطه ای زائده ای انجام شده است. دور اندیش و همکاران [۱۴] اثر ارتفاع زائده و نیر سرعت چرخش بر خواص اتصالات آلیاژ ۲۰۲۴ مورد بررسی قرار داده و گزارش کرده اند

<sup>1</sup> -Resistant spot welding

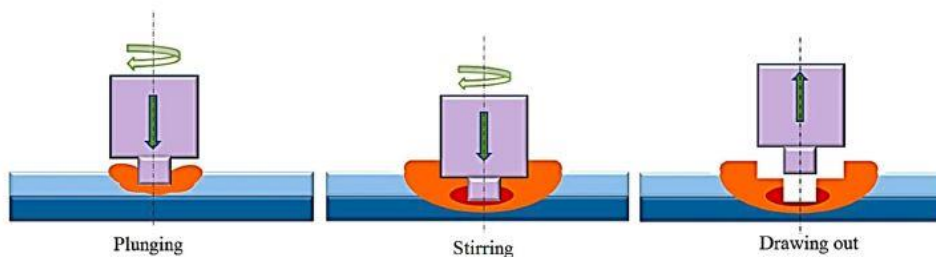
<sup>2</sup> -friction stir spot welding

منظور حذف هرگونه آلودگی با استون تمیزکاری شدند. ابزار به کار گرفته شده در فرآیند از جنس فولاد H13 با قطر ۱۶ میلی متر است. در این تکنیک 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 میلی‌متر 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. جوشکاری تحت اثر پارامترهای متغیر زمان نگهداری ابزار در سه سطح ۴، ۶ و ۸ ثانیه عمق فروروی ابزار در سه اندازه ۰/۱، ۰/۱۴ و ۰/۱۸ میلی‌متر و پارامتر ثابت سرعت چرخش ۱۶۰۰ rpm انجام شده است. انتخاب پارامترها براساس تست‌های کارگاهی [۲۰] انجام گرفته و نیز منابع ۱۴ تا ۱۹ 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 آماده‌سازی سطح نمونه‌ها جهت آشکارسازی ریزساختار از محلول حکاکی کلر (HCl 30ml, HF 2/5ml, HNO<sub>3</sub> 40ml, H<sub>2</sub>O 42/5) به مدت زمان ۲۰ ثانیه استفاده شد. تصاویر ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری مدل Olympus GX51 مجهز به دوربین دیجیتال تهیه شده است. به منظور ارزیابی خواص مکانیکی نمونه‌هایی با ابعاد استاندارد تست کشش-برش (۴۵\*۱۰۵) میلی‌متر براساس استاندارد تست کشش ANSI/AWS/SAE/D8.2 [۲۰] تهیه و آزمون به کمک دستگاه STM20-SANTAM انجام شده است. در هر شرایط ۳ نمونه تهیه و تست کشش انجام شد، در آخر مقادیر میانگین به عنوان نتایج گزارش شده است. به منظور بررسی دقیق مکانیزم‌های شکست تصاویر سطح شکست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل prox ساخت شرکت phenom مورد بررسی قرار گرفتند.

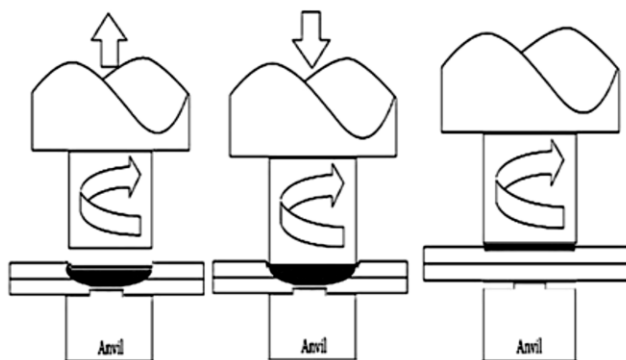
که افزایش سرعت چرخش، موجب بهبود خواص جوش و افزایش استحکام می‌شود. همچنین زرقانی و همکاران [۱۵] اثر زمان نگهداری و قطر شانه ابزار بر خواص جوش‌های حاصل از روش زائده‌ای را برای آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ مورد مطالعه قرار داده و بیان کرده‌اند که افزایش زمان نگهداری تا یک سطح خاص، موجب افزایش استحکام شده در حالی که مقادیر بالاتر موجب افت در خواص جوش است. شهرآبادی و همکاران [۱۷] این روش را برای فولاد کم کربن و تحت اثر پارامتر عمق فروروی مورد مطالعه قرار داده و بیان کرده‌اند که افزایش عمق فروروی، سبب بهبود خواص جوش می‌شود. در آخرین تحقیقات صورت گرفته فرمانبر و همکاران روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی زائده‌ای را برای آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ انجام دادند. محققین گزارش کرده‌اند که افزایش در پارامتر سرعت چرخش افزایش اندازه دانه ناحیه همزده شده را به دنبال دارد؛ اما به سبب افزایش مساحت اتصال استحکام اتصال بالاتر است [۱۸][۱۹]. اما تاکنون پژوهشی مبنی بر به کارگیری این روش برای آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر آلومینیوم نظیر ۶۰۶۱ منتشر نشده است. بنابراین هدف از این پژوهش، استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای زائده‌ای برای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و بررسی تاثیر پارامترهای فرآیند بر خواص جوش و در آخر مقایسه خواص جوش حاصل از این روش با سایر روش‌های جوشکاری اصطکاکی نقطه‌ای است.

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش، جهت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای ورق‌های آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با ضخامت ۱ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته است. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی از فلز پایه در جدول ۱ و ۲ گزارش شده است. نمونه‌های آزمایش طبق استاندارد (AWS) به شکل صفحات مستطیل شکل با ابعاد (۴۵ × ۱۰۵) میلی‌متر تهیه شده که سطح قرارگیری دو ورق بر روی هم (۳۵ × ۴۵) میلی‌متر مربع تعیین و جوشکاری در مرکز این ناحیه انجام شده است. قبل از فرآیند جوشکاری ورق‌های آلومینیوم به



شکل ۱- مراحل انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای [۶]



شکل ۲- شماتیکی از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای زائده‌ای [۱۶]

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ورقه‌های آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
۰/۵۹	۰/۳۸	۰/۲۶	۰/۰۳	۰/۹۶	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۲۵	پایه

جدول ۲- خواص مکانیکی ورقه‌های آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

سختی (HV)	درصد تغییر شکل	تنش تسلیم (Mpa)	تنش کششی نهایی (Mpa)	فلز پایه
۱۰۰	۱۷	۲۷۰	۳۰۵	آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

## نتایج و بحث

### سطح ظاهری جوش

استفاده از ابزار بدون پین کاملاً صاف بوده و هیچ فرورفتگی در آن دیده نمی‌شود. سطح پشتی از جوش (شکل ۳ب) شامل حفره‌ای با قطر و عمقی برابر با قطر و ارتفاع زائده به کارگرفته شده زیر ورق‌ها است. عمق و قطر فرورفتگی ایجاد شده در سطح پشتی تقریباً برابر با فرورفتگی ایجاد شده

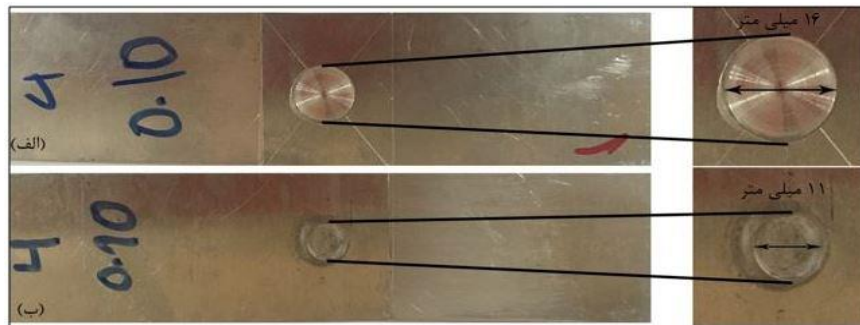
شکل ۳(الف و ب) سطح ظاهری از نمونه‌های جوش داده شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل قابل مشاهده است، سطح بالایی از جوش (شکل ۳الف) به دلیل

ضخامت ورق بالا، طول اتصال و عمق ناحیه همزده شده مشخص شده است. همچنین شکل ۵(ب) بخشی از ساختار فصل مشترک را که در شکل الف با دایره مشخص شده است با بزرگنمایی بالاتر نشان می‌دهد. بر طبق ساختار فصل مشترک، مشخص است که مکانیزم اتصال در فصل مشترک نفوذ حالت جامد است. فصل مشترک اتصال در جوش‌های نقطه‌ای اصطکاکی شامل بخش‌هایی با اتصال ناقص در لبه‌ها و بخش‌هایی با اتصال کامل در فاصله‌ای دور از لبه‌ها است. که به ترتیب در شکل‌های ۵(ج) و (د) نشان داده شده است. در تحلیل وضعیت فصل مشترک این طور به نظر می‌رسد که در مرکز با توجه به هم خوردگی بیش‌تر مواد ناشی از سیلان بالا و نیز حضور سندان که جریان مواد را از حالت موازی با فصل مشترک خارج می‌کند، قصل مشترک دارای ساختاری یکپارچه با دانه‌بندی منظم و اتصال کامل است؛ اما در بخش‌هایی کناری اتصال به خوبی شکل نگرفته است که می‌توان آن را به حضور ناخالصی‌ها نسبت داد.

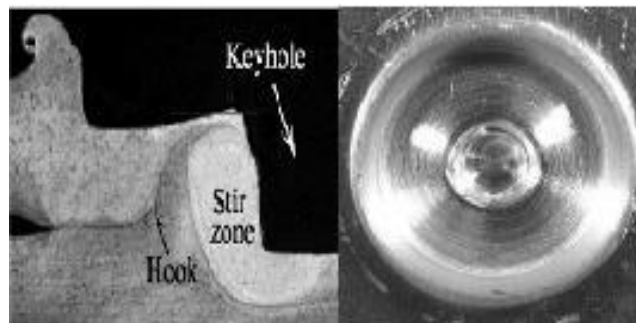
ناشی از الکتروود در روش نقطه‌ای مقاومتی است و با توجه به اینکه روش مقاومتی به طور گسترده در صنعت خودرو سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد، پس این روش نیز از نظر ظاهری مشکلی ندارد. لازم به ذکر است که تغییر پارامترهای فرآیند تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر سطح ظاهری جوش نداشته و تنها افزایش زمان نگهداری، سبب بروز پلیسه در اطراف جوش است. پلیسه‌ها در حقیقت مواد نرم شده زیر ابزار هستند که در اثر چرخش ابزار به کناره‌های اتصال منتقل می‌شود. به منظور مقایسه یک سطح ظاهری از جوشکاری اصطکاکی نقطه‌ای معمولی در شکل ۴ آورده شده است [۲۱].

### ماکروساختار

همان‌گونه که ذکر شد، پارامترهای فرآیند بر خواص اتصال اثر گذار هستند. شکل ۵الف ماکرو ساختار نمونه در زمان ۸ ثانیه و عمق فروروی ۰/۱۸ میلی‌متر را نشان می‌دهد که در آن پارامترهای مهم و اثرگذار بر خواص اتصال نظیر



شکل ۳- تصویر ناحیه جوش به روش جوشکاری همزن اصطکاکی نقطه‌ای زائده‌ای (الف) سطح بالایی از جوش، (ب) سطح پستی که اثر زائده میز کار به صورت فرورفتگی کم عمق قابل مشاهده است



شکل ۴- فرورفتگی باقی مانده روی سطح جوش در روش جوشکاری اصطکاکی نقطه‌ای معمولی [۲۱]

### ریز ساختار

تغییر پارامترهای جوشکاری سبب تغییر دما، کرنش، نرخ کرنش و نرخ سرد شدن و گرم شدن می‌شود که از جمله عوامل اثر گذار در تغییرات ریزساختاری هستند [۲۱] ماکرو و میکروساختار از مناطق مختلف جوش به ترتیب در شکل-های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. شکل ۹ ماکرو ساختار نمونه با زمان ۸ ثانیه و عمق فروروی ۰/۱۸ میلی‌متر را نشان می‌دهد. ناحیه جوش از منظر ریزساختاری به چهار ناحیه شامل فلز پایه (BM)، ناحیه همزده شده (SZ)، ناحیه تحت عملیات ترمومکانیکی<sup>۳</sup> (TMAZ) و ناحیه متأثر از حرارت<sup>۴</sup> (HAZ) تقسیم بندی می‌شود که هر کدام دارای ویژگی‌های ریزساختاری متفاوت هستند که در ادامه کامل توضیح داده شده است. همچنین شکل ۱۰ ریز ساختار هر کدام از این نواحی را برای نمونه با زمان ۶ ثانیه و عمق فروروی ۰/۱ میلی‌متر با استفاده از میکروسکوپ نوری نشان می‌دهد. شکل ۱۰ (الف) ریزساختار فلز پایه را نشان می‌دهد که با توجه به وضعیت فلز پایه که در حالت نورد شده استفاده شده است، دارای بافت کشیده‌ای از دانه‌ها و توزیع غیر یکنواخت از رسوبات است. میانگین اندازه دانه در فلز پایه با استفاده از روش تقاطع خطی ۹ میکرومتر اندازه گیری شده است. ریزساختار ناحیه همزده شده در شکل ۱۰ (ب) نشان داده شده است. این ناحیه درست زیر ابزار واقع شده و تغییر شکل پلاستیک شدید و گرمای ناشی از اصطکاک ابزار با سطح، سبب پدیده تبلور مجدد دینامیکی در این ناحیه می‌شود که نتیجه آن تولید ریز ساختار دانه ریز و هم محور است [۲۶-۲۸]. متوسط اندازه دانه در این ناحیه حدود ۵ میکرومتر اندازه گیری شد که از فلز پایه کوچک‌تر است. وجود ریز ساختار ریز در ناحیه همزده شده سبب می‌شود که سختی در این ناحیه نسبت به سایر مناطق تغییر کند. در ناحیه همزده شده علاوه بر اندازه دانه رسوبات نیز دچار تغییراتی می‌شوند. آلومینیوم ۶۰۶۱ معمولاً از طریق عملیات حرارتی پیر سختی مصنوعی ساخته می‌شود، حاوی رسوباتی

فرآیند همزن اصطکاکی به عنوان یک اتصال حالت جامد به کیفیت سطح بسیار وابسته است و همین عامل نیاز به تمیز کاری قبل از فرآیند را ضروری می‌سازد. شکل ۷ به ترتیب اثر پارامترها بر عمق ناحیه همزده شده و طول اتصال را نشان می‌دهد. بر اساس شکل‌ها واضح است که افزایش هر دو پارامتر متغیر فرآیند (زمان نگهداری ابزار و عمق فروروی ابزار)، موجب افزایش عمق ناحیه همزده و طول اتصال می‌شود. در توضیح این مطلب می‌توان گفت که افزایش پارامترها منجر به افزایش گرمای اصطکاکی و افزایش دما می‌شود که در نتیجه افزایش سیلان و افزایش حجم مواد خمیری در نواحی نزدیک به فصل مشترک را به دنبال دارد که نتیجه آن افزایش طول ناحیه اتصال است [۲۲ و ۲۳]. پروفیل‌های دمایی ثبت شده در طول فرآیند نیز موید افزایش دما با افزایش پارامترها است. در تحقیقات دیگر نیز نتایج مشابهی به دست آمده است که افزایش زمان نگهداری به سبب افزایش حجم مواد نرم شده افزایش عمق ناحیه همزده و نیز طول اتصال را به دنبال دارد [۱۵ و ۲۴]. یکی دیگر از پارامترهای مهم و اثر گذار در استحکام و وضعیت شکست، ضخامت اتصال و نیز ضخامت ورق بالا است. فاصله فصل مشترک بین ورق بالا و پایین تا محل تحت اثر شانه ابزار به عنوان ضخامت ورق بالا در نظر گرفته می‌شود. شکل ۸ اثر پارامترهای فرآیند بر ضخامت ورق بالا را نشان می‌دهد. بر اساس شکل، افزایش در پارامترهای متغیر کاهش ضخامت ورق بالا را سبب می‌شود. مهم‌ترین دلیل برای کاهش ضخامت مربوط به اثر دما است. با افزایش پارامترها همان‌گونه که ذکر شد، دما افزایش یافته و به دنبال آن حرکت و سیلان مواد در اثر چرخش ابزار به لبه‌های اتصال به شکل پلیسه بیشتر شده که همین عامل کاهش ضخامت را به دنبال دارد. همچنین از جهت دیگر با افزایش بیش‌تر دما ابزار انبساط یافته و با ورود به داخل مواد خمیری حجم بیشتری از مواد را به بیرون منتقل می‌کند. به طور کلی خروج و انتقال مواد و شکل گیری پلیسه به معنای حذف مقداری از مواد در اتصال و در نتیجه کاهش ضخامت اتصال و به دنبال آن کاهش ضخامت ورق بالا است [۲۲ و ۲۵].

1 - base metal

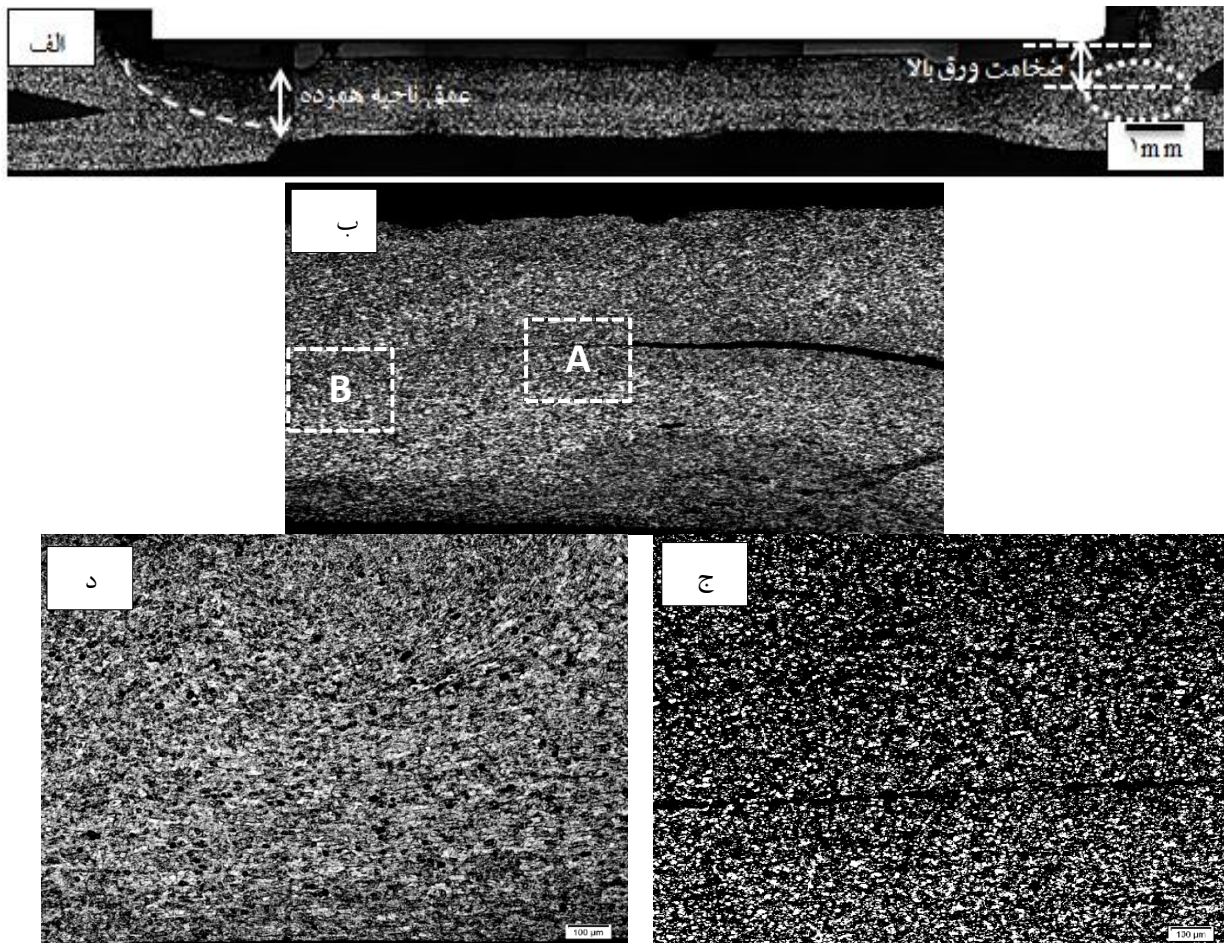
2 - Stir zone

3 - thermo-mechanically affected zone

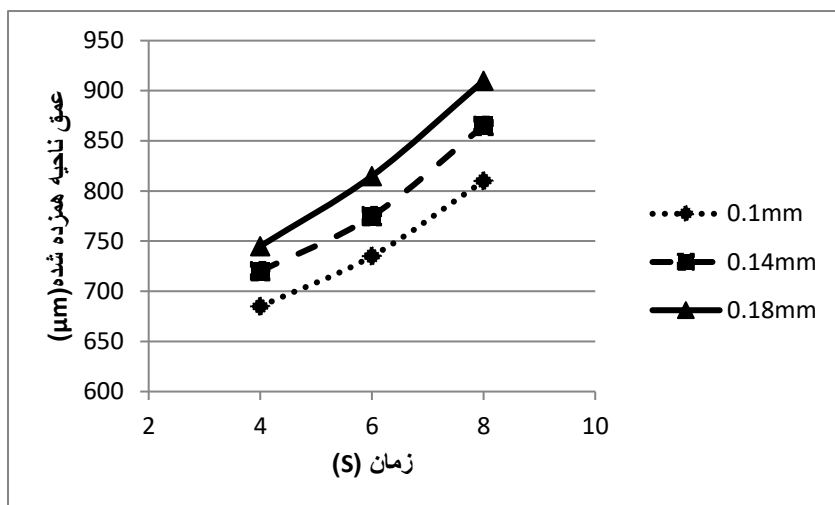
4 - heat affected zone

شده‌اند. سان و همکاران [۳۰] در جوشکاری آلیاژ ۶۰۶۱ نتیجه مشابه را گزارش کرده‌اند. شکل ۱۰ ج ریزساختار ناحیه متأثر از حرارت-تغییر شکل را نشان می‌دهد. در این ناحیه مواد تحت تأثیر حرارت و تغییر شکل می‌باشند؛ اما میزان کرنش پلاستیک به اندازه کافی برای وقوع تبلور مجدد نیست. بنابراین، تبلور مجدد در آن یا اتفاق نمی‌افتد و یا خیلی جزئی است [۳۱]. این ناحیه به صورت یک ناحیه کوتاه و گذرا در مرز بین ناحیه همزده شده و ناحیه متأثر از حرارت قرار گرفته است که دارای ساختاری با دانه‌های کشیده شده در جهت سیلان مواد است. کشیده شدن دانه‌ها ناشی از تنش برشی است که توسط جریان مواد اعمال می‌شود [۳۲].

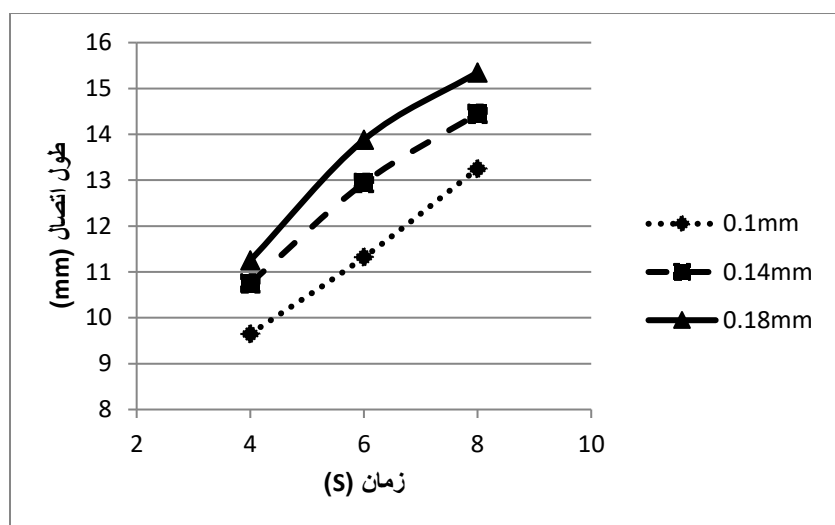
با اندازه و شکل‌های مختلف شامل صفحه‌ای و سوزنی است که تعیین کننده خواص آلیاژ هستند [۲۹]. این رسوبات از جنس  $Mg_2Si$  بوده و اندازه و توزیع آن‌ها تاثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی از جمله سختی و استحکام می‌گذارد. بر اساس شکل ۱۱ که تصویر فلز پایه و ناحیه همزده شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی را نشان می‌دهد، می‌توان دریافت که در ناحیه همزده شده رسوبات ریزتر از فلز پایه بوده و با توزیع یکتواختی قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه ماکزیمم دمای ثبت شده کم‌تر از دمای انحلال رسوبات است، پس می‌توان نتیجه گرفت این رسوبات ریز در اثر شکسته شدن رسوبات درشت در اثر چرخش ابزار ایجاد



شکل ۵- الف) ماکروساختار اتصال در زمان ۸ ثانیه و عمق فروروی ۰/۱۸، ب) بخشی از ساختار فصل مشترک در شکل الف با علامت دایره مشخص است، ج) ناحیه A در شکل (ب) و د) ناحیه B در شکل (ب)



شکل ۶ - نمودار اثر پارامترهای فرآیند بر عمق ناحیه همزده شده



شکل ۷-نمودار اثر پارامترهای فرآیند بر طول اتصال

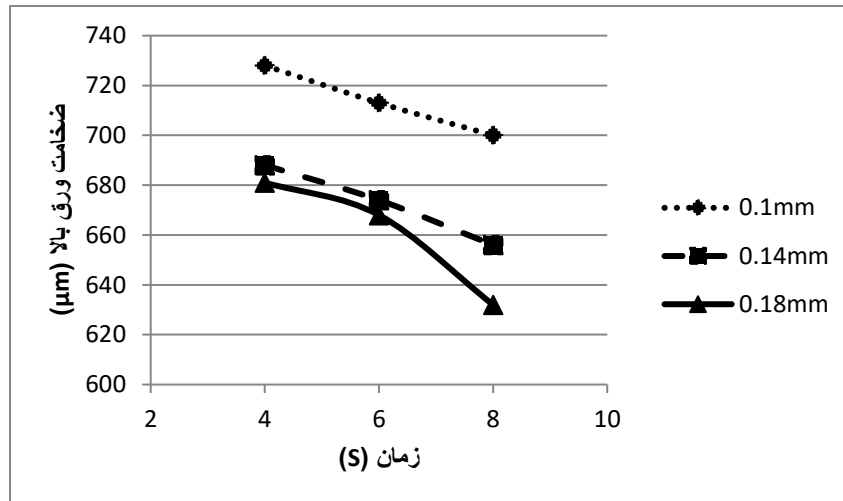
تسریع شده و جذب عناصر آلیاژی منجر به رشد رسوبات شده است [۳۴]. همان‌گونه که قبلاً نیز ذکر شد، افزایش زمان نگهداری ابزار، افزایش حرارت ورودی و در نتیجه افزایش دما را به دنبال دارد. پس می‌توان نتیجه گرفت که تغییر پارامترها بر ساختار نواحی جوش نیز اثر گذار باشد. اندازه گیری اندازه دانه در ناحیه همزده نشان داد که در عمق فروروی یکسان ۰/۱۴ با افزایش زمان از ۴ به ۶ ثانیه اندازه دانه از ۵ به ۷ میکرومتر تغییر می‌کند. به طور مشابه در زمان مشابه ۴ ثانیه با افزایش عمق فروروی از ۰/۱۴ به

در اخر شکل ۱۰ (د) ریز ساختار ناحیه متأثر از حرارت را نشان می‌دهد که در فاصله بین فلز پایه و ناحیه متأثر از حرارت-تغییر شکل قرار گرفته است. این ناحیه تنها تحت اثر حرارت قرار گرفته و هیچ گونه تغییر شکلی را تجربه نمی‌کند. بنابراین، ساختار آن مشابه با فلز پایه و با اندازه دانه بزرگ‌تر از آن ظاهر می‌شود [۳۳]. نکته قابل ذکر در مورد این ناحیه درشت بودن رسوبات این ناحیه در مقایسه با فلز پایه و ناحیه همزده شده است. در توضیح این موضوع می‌توان بیان کرد که با افزایش دما در این ناحیه پدیده نفوذ

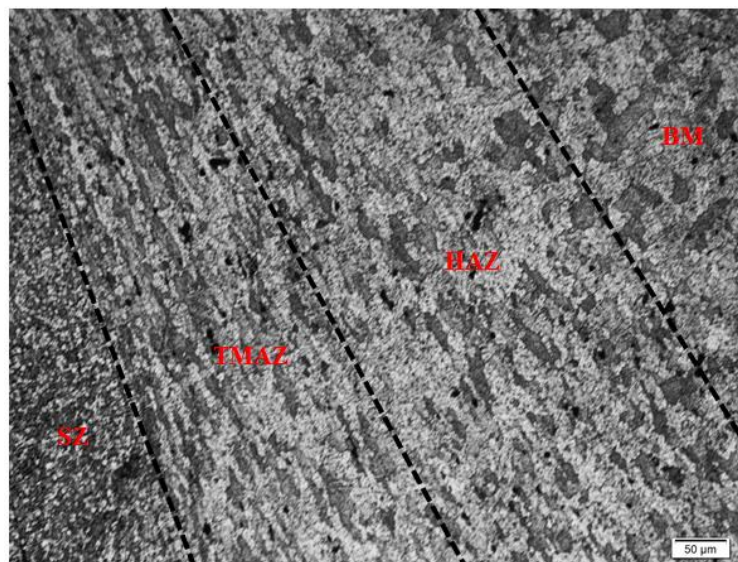


است که افزایش پارامترها، سبب تغییر قابل توجه در اندازه دانه ناحیه متأثر از حرارت نمی‌شود که دلیل آن را می‌توان به انتقال حرارت بالای آلومینیوم نسبت داد [۴ و ۱۵].

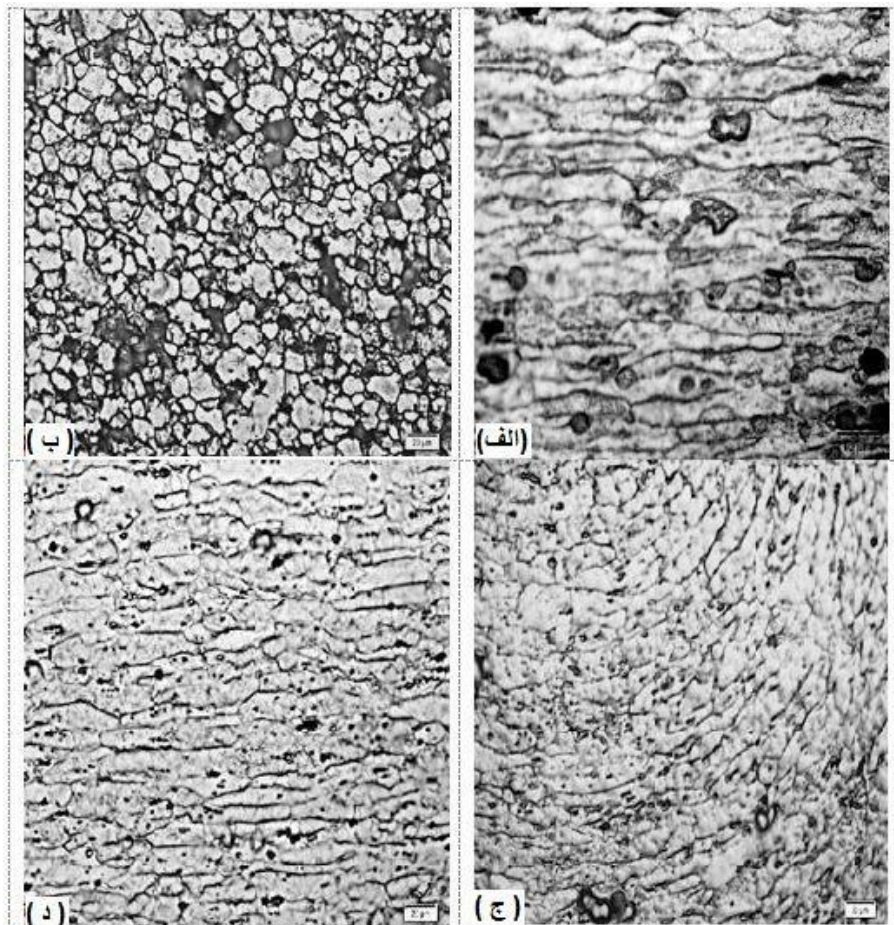
۰/۱۸ اندازه دانه از ۵ به ۸ میکرومتر تغییر می‌کند. روند مشابهی در سایر نمونه‌ها وجود دارد. تحقیقات دیگری نیز نتیجه مشابه را گزارش کرده‌اند که افزایش زمان نگهداری افزایش اندازه دانه را به دنبال دارد [۱۰ و ۳۴]. لازم به ذکر



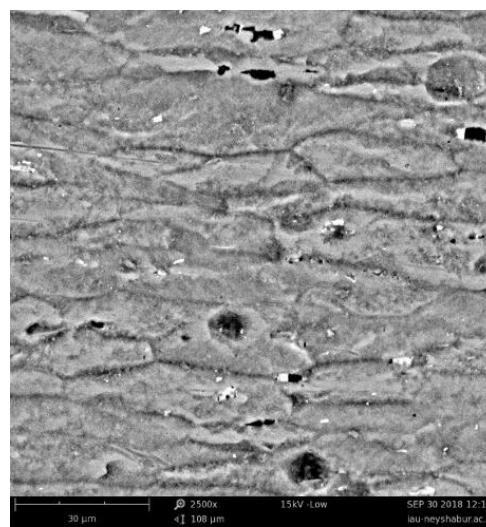
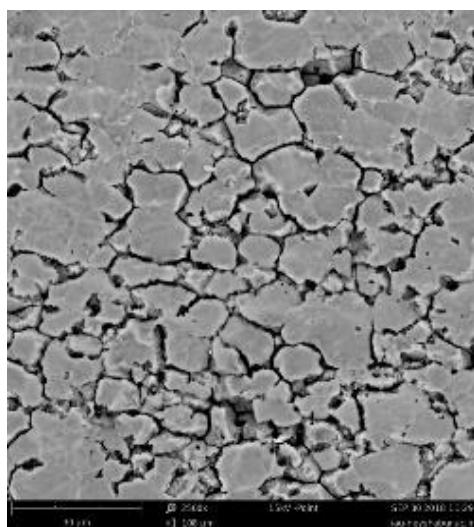
شکل ۸- نمودار اثر پارامترهای فرآیند بر ضخامت ورق بالا



شکل ۹- (الف) ماکرو ساختار نمونه با زمان ۶ ثانیه و عمق فروروی ۱/۱۰۰۰ میلی‌متر



شکل ۱۰- ریزساختار نواحی جوش نمونه ۶۰۶۱-۰/۱۴: (الف) ناحیه فلز پایه (ب) ناحیه هم زده (ج) ناحیه متأثر از حرارت - تغییر شکل (د) ناحیه متأثر از حرارت



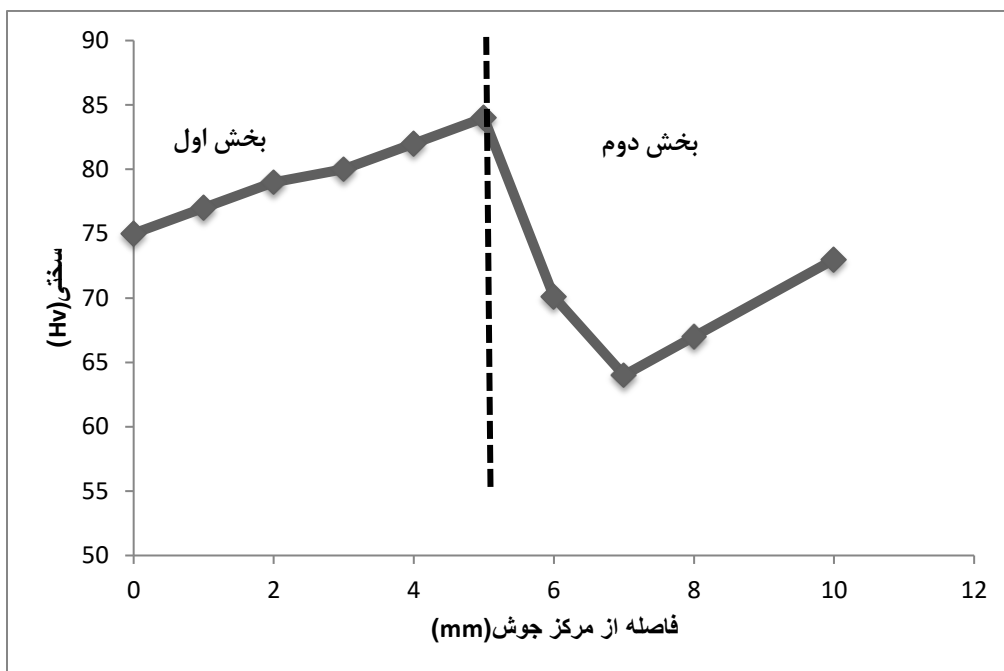
شکل ۱۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از تفاوت اندازه رسوب ها در (الف) فلز پایه، (ب) ناحیه همزده شده

## خواص مکانیکی

### پروفیل سختی

شکل ۱۲ پروفیل سختی برای نمونه با زمان ۶ ثانیه و عمق فروروی ابزار ۰/۱ میلی‌متر را برای ورق بالا نشان می‌دهد. بر اساس شکل پروفیل سختی به دو بخش تقسیم می‌شود. در بخش اول سختی با حرکت از مرکز ناحیه همزده شده به سمت لبه‌ها افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش مربوط به اندازه دانه بر اساس رابطه هال پیچ و نیز اندازه رسوبات است. در ناحیه همزده شده، اندازه دانه به سبب پدیده تبلور مجدد ریز و رسوبات در اثر چرخش ابزار شکسته شده و به رسوبات ریز تبدیل شده‌اند که هر دو عامل، سبب افزایش در سختی نسبت به فلز پایه است. همچنین قابل ذکر است که با توجه به تفاوت سرعت خطی ابزار از مرکز به سمت لبه، گرادیان اندازه دانه به وجود می‌آید که تفاوت سختی در لبه‌ها و مرکز را به همراه دارد؛ اما با رسیدن با

ناحیه متأثر از حرارت به سبب رشد دانه و رسوبات، سختی به میزان قابل توجهی کاهش یافته و با رسیدن به فلز پایه سختی مجدداً افزایش می‌یابد. قابل ذکر است که روند مشابهی برای سختی ورق پایین مشاهده شد، با این تفاوت که سختی در ناحیه همزده کم‌تر از ورق بالا اندازه‌گیری شد. این پدیده به دلیل این است که مواد در ورق پایین کم‌تر دچار هم‌خوردگی می‌شود که همین عامل، درشت بودن رسوبات را به دنبال دارد. نتیجه مشابه در سایر تحقیقات انجام گرفته روی آلومینیوم ۶۰۶۱ گزارش شده است [۱۳]. پروفیل سختی برای تمام نمونه مشابه است؛ اما افزایش در هر دو پارامتر زمان نگهداری ابزار و عمق فروروی ابزار کاهش در سختی را به دنبال دارد. به طور مثال در نمونه با عمق فروروی ۰/۱۴ با افزایش زمان از ۴ به ۸ ثانیه سختی از ۸۴ به ۷۶ کاهش یافته و در زمان مشابه ۴ ثانیه با افزایش عمق فروروی ابزار به ۰/۱۸ سختی از ۸۴ به ۷۲ کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲- پروفیل سختی اندازه‌گیری شده در نمونه با زمان ۶ ثانیه و عمق فروروی ۰/۱ میلی‌متر

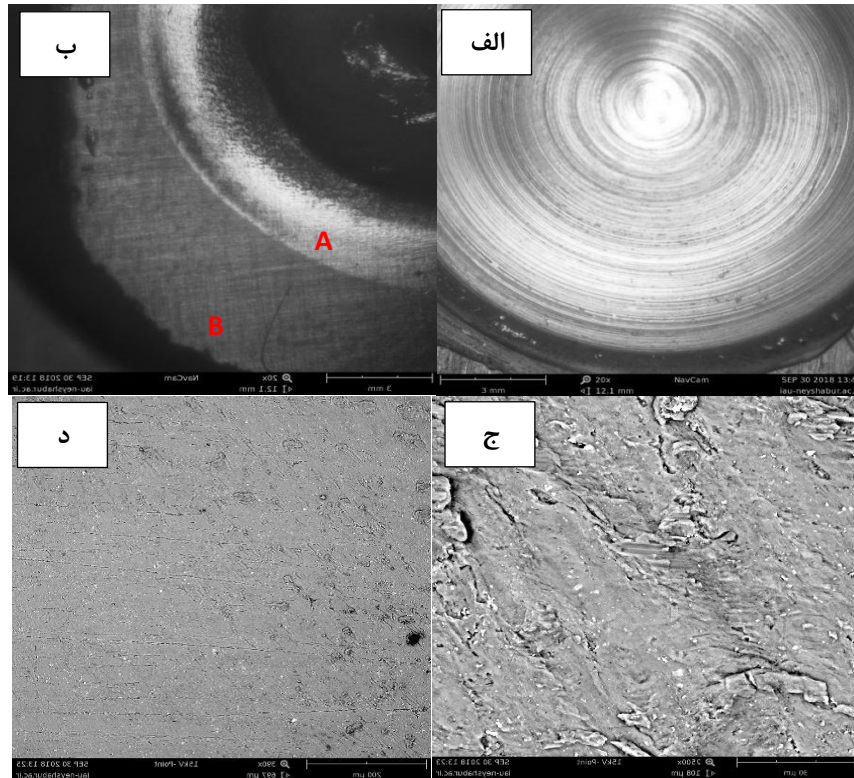
## وضعیت شکست

وضعیت شکست، ترک از فصل مشترک شروع شده و مقداری پیشروی در امتداد فصل مشترک دارد. سپس با رسیدن به ناحیه همزده شده که دارای سختی بسیار بالایی است، تغییر مسیر داده و مسیر کوتاه تر ورق بالا را برای رشد برمی‌گزیند که همین عامل، سبب باقی ماندن بخشی از ورق بالا روی ورق پایین می‌شود [۳۵]. شکل ۱۴ سطح شکست محیطی گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی را نشان می‌دهد که در آن رشد ابتدایی به صورت فصل مشترکی و کندی در امتداد ضخامت ورق بالا نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این نمونه بیشترین میزان استحکام را نشان داده است.

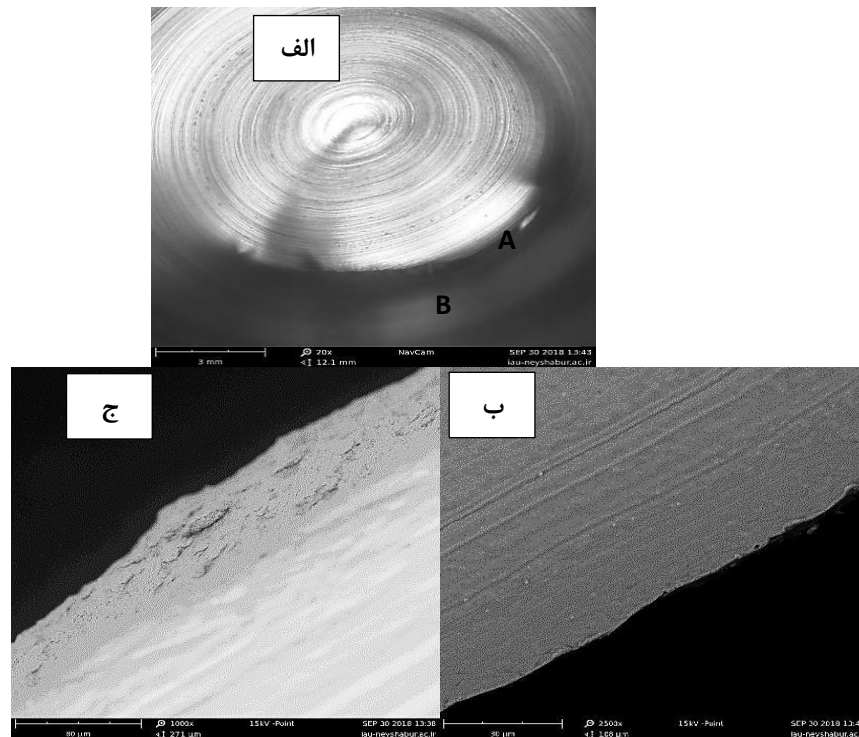
## استحکام کششی

شکل ۱۵ اثر پارامترهای زمان نگهداری و عمق فروروی ابزار بر حداکثر نیروی قابل تحمل را نشان می‌دهد. همان‌گونه که واضح است، برای عمق فروروی ۰/۱ و ۰/۱۴ افزایش زمان نگهداری، کاهش نیرو را به دنبال دارد. دلیل این پدیده را می‌توان به کاهش سختی نمونه‌ها با افزایش زمان ارتباط داد. همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد، وضعیت شکست به صورت فصل مشترکی است و وقتی سختی کاهش می‌یابد؛ مسیر رشد ترک تسهیل شده که کاهش نیروی شکست را به دنبال دارد. در نمونه‌هایی با عمق فروروی ۰/۱۸ میلی‌متر با افزایش زمان، افزایش نیرو را به دنبال دارد که دلیل آن تغییر هندسه قلاب و مکانیزم شکست متفاوت است. همچنین باید این نکته را در نظر داشت که با تغییر عمق فروروی ابزار مکان شکست تغییر و استحکام اتصال تغییر می‌کند که این نشان دهنده اهمیت عمق فروروی در استحکام اتصال است [۳۷]. بررسی‌ها نشان داد که تکنیک استفاده شده در این پژوهش، سبب افزایش استحکام اتصال شده است. در تحقیقات جوشکاری همزن اصطکاکی نقطه‌ای با سایر روش‌ها برای ورق‌های با ضخامت یکسان ۱ میلی‌متر استحکام‌ها برابر با ۲۷۰۰ نیوتون [۳۶] و ۳۳۰۰ [۳۸] گزارش شده است که به طور قابل توجهی کم‌تر از استحکام به دست آمده در این روش ۴۴۰۰ است.

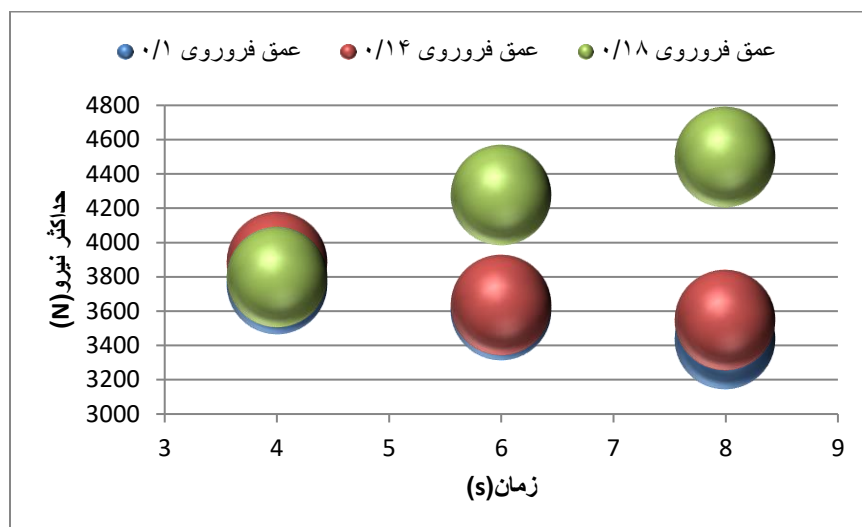
بررسی حالت شکست جوش‌های نقطه‌ای یکی از روش‌های ارزیابی کیفی آن‌ها بشمار می‌رود. به‌طور کلی نمونه‌های جوشکاری نقطه‌ای در آزمون کشش - برش دارای دو حالت شکست فصل مشترکی و شکست محیطی هستند [۳۵]. در نمونه‌های مورد بررسی نمونه با زمان ۸ ثانیه و عمق فروروی ۰/۱۸ میلی‌متر به صورت محیطی دچار شکست شده است در حالی که تمام نمونه‌های دیگر به صورت فصل مشترکی شکسته است. نمونه‌هایی با عمق فروروی ۰/۱۰ و ۰/۱۴ میلی‌متر به صورت فصل مشترکی دچار شکست شده‌اند. از جمله عوامل اثر گذار در وضعیت شکست فصل مشترکی عمق ناحیه همزده شده، سختی، طول اتصال و هندسه قلاب است [۳۶]. در این وضعیت شکست، ترک از فصل مشترک دو ورق شروع شده و در مسیر عیب هندسی قلاب و در امتداد فصل مشترک پیشرفت می‌کند. بنابراین، دو ورق در راستای فصل مشترک از یکدیگر جدا شده و در سطح مقطع هیچ پارگی دیده نمی‌شود. شکل ۱۳ سطح شکست فصل مشترکی گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی را نشان می‌دهد. اثر همزدگی مواد ناشی از حرکت ابزار در شکل ۱۵ (الف) مشخص بوده و صافی سطح در شکل ۱۳ (ب) نشان می‌دهد که در این ناحیه هیچ گونه اتصالی شکل نگرفته است؛ اما وجود دیپل‌ها در شکل ۱۳ (ج) مشخص کننده برقراری اتصال دو ورق بوده و کشیده شدن جزئی دیپل‌ها نشان دهنده اعمال تنش برشی است که از عوامل موثر در شکست فصل مشترکی محسوب می‌شود؛ اما نمونه با عمق فروروی ۰/۱۸ میلی‌متر به صورت محیطی دچار شکست شده که در این وضعیت بخشی از ورق بالا بر روی ورق پایین باقی می‌ماند. اثرگذارترین پارامتر در شکل‌گیری این حالت شکست ضخامت ورق بالا و نیز سختی ناحیه همزده شده است. طبق نتایجی که پیش از این ارائه شد، این نمونه دارای بالاترین عمق ناحیه همزده شده، بیشترین سختی و کم‌ترین ضخامت ورق بالا است که قرارگیری آن‌ها در کنار یکدیگر شکست محیطی را به دنبال دارد. در حقیقت در این



شکل ۱۳- (الف) و (ب) سطح شکست فصل مشترکی. (ج) ناحیه مشخص شده A در (ب) که نشان دهنده دیمپل‌های به صورت جزئی کشیده شده است، (د) ناحیه مشخص شده B در (ب) که سطح صاف نشان دهنده عدم اتصال بین دو سطح است



شکل ۱۴- (الف) سطح شکست محیطی، (ب) ناحیه مشخص شده A در تصویر الف، (ج) ناحیه مشخص شده B در تصویر الف



شکل ۱۵- تاثیر پارامترهای زمان و عمق فروروی ابزار بر حداکثر نیروی قابل تحمل در کشش.

عمق ناحیه همزده شده از ۷۵۰ به ۹۰۰ میکرومتر افزایش می‌یابد.

(۴) بیشینه استحکام جوش در این پژوهش مربوط به نمونه (۰/۱۸ - ۸) برابر با ۴۴۹۵/۵ نیوتن است. این نمونه به دلیل مود شکست محیطی و اتصال مناسب در فصل مشترک دارای بیشینه نیروی شکست بالایی است.

(۵) افزایش هردو پارامترها به دلیل تولید گرمای بیش‌تر و کمک به رشد دانه و نیز رسوبات، کاهش در سختی را به دنبال دارد.

(۶) دو وضعیت شکست محیطی و فصل مشترکی در نمونه‌ها مشاهده شد. شکست فصل مشترکی عموماً در نمونه‌ها با پارامترهای فرآیند پایین رخ داده است که می‌تواند به دلیل عدم همزدگی مناسب در فصل مشترک باشد.

## نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر عمق فروروی و زمان نگهداری ابزار در اتصال آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با استفاده از روش جوشکاری همزن اصطکاکی نقطه‌ای زائده‌ای مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر عنوان نمود:

(۱) کیفیت بالای ظاهری جوش و عدم وجود فرورفتگی در سطح جوش مزیت اصلی به کارگیری این روش نسبت به سایر روش‌های مشابه می‌باشد.

(۲) افزایش پارامترهای فرآیند جوشکاری، سبب افزایش عمق فروروی ابزار درون قطعه و خروج مواد از اتصال شده است که کاهش ضخامت مؤثر ورق بالایی را به دنبال دارد.

(۳) افزایش در پارامترها، سبب افزایش عمق ناحیه همزده شده و طول اتصال می‌شود که دلیل آن تولید گرمای اصطکاکی و نیز همزدگی بیش‌تر مواد است. با افزایش زمان نگهداری از ۴ به ۸ در عمق فروروی ثابت ۰/۱۸ میلی‌متر

**References:**

- 1- Joaquín M. Piccinia, Hernán G. Svobodab." Effect of the tool penetration depth in Friction Stir Spot Welding (FSSW) of dissimilar aluminum alloys" .Procedia Materials Science 8 ( 0).p: 868 – 877. (2015).
- 2-H. Aghajani Derazkola, H. Rahmani, M. Habibnia, M. B. Limoie, The feasibility study on AA7075 T-joint via friction stir welding process, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 21-32, (2016).
- 3-N Pathak,K. Bandyopadhyay,M.Sarangi, and Sushanta Kumar Panda Microstructure and Mechanical Performance of Friction Stir Spot-Welded Aluminum-5754 Sheets, (2013).
- 4-PhilipB Prangnell ,and Dimitrios Bakavos "Novel Approaches to Friction Spot Welding Thin Aluminium Automotive Sheet" -Materials Science Forum Vols, (2010).
- 5-Y. Bozkurt and S. Salman, "Effect of welding parameters on lap shear tensile properties of dissimilar friction stir spot welded AA 5754-H22 / 2024-T3 joints," vol. 18, no. 4, (2013).
- 6-M. Yamamoto, a. Gerlich, T. H. North, and K. Shinozaki, "Cracking and Local Melting in Mg-Alloy and Al-Alloy During Friction Stir Spot Welding, " Weld. World, vol. 52, no. 9–10, pp. 38–46, (2008).
- 7- Y. Uematsu a,\* , K. Tokaji a, Y. Tozaki b, T. Kurita c, S. Murata .Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behaviour of friction stir spot welded joints in Al–Mg–Si alloy .International Journal of Fatigue 30 (2008) 1956–1966
- 8- 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.1c, pp.656–665, 2014.
- 9-Y. Tozaki, Y. Uematsu, K. Tokaji , A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance , Journal of Materials Processing Technology 210, (2010).
- 10- 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).
11. Adrian Gerlich Æ Peter Su Æ Motomichi Yamamoto Æ. Tom H. North. Effect of welding parameters on the strain rate and microstructure of friction stir spot welded 2024 aluminum alloy. J Mater Sci (2007) 42:5589–5601
12. 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.
13. S. Venukumar, S. G. Yalagi, S. Muthukumaran and S. V. Kailas Static shear strength and fatigue life of refill friction stir spot welded AA 6061-T6 sheets.
- 14- S. Dourandish, S. M. Mousavizade, H. R. Ezatpour & G. R. Ebrahimi, "Microstructure, mechanical properties and failure behaviour of protrusion friction stir

- spot welded 2024 aluminium alloy sheets, (2017).
- 15- Zarghani, F., et al., High mechanical performance of similar Al joints produced by a novel spot friction welding technique. Vacuum, (2018).
- 16- زرغانی، ف. موسوی زاده، م. ابراهیمی، غ و عزت پور، ح. "تاثیر زمان نگهداری و قطر شانه ابزار بر استحکام و رفتار شکست فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای زائده‌های آلیاژ آلومینیوم 2024". مجله مواد نوین / جلد ۸ / شماره 4 / تابستان ۱۳۹۷
- 17- A R Shahrabadi , S M Mousavizade , H R Ezatpour and M Pouranvari Achieving high mechanical performance in protrusion friction stir spot welding (PFSSW) of DQSK steel compared to other techniques
18. N. Farmanbar, S.M. Mousavizade, H.R. Ezatpour, Achieving special mechanical properties with considering dwell time of AA5052 sheets welded by a simple novel friction stir spot welding. Marine Structures 65 (2019) 197–214
19. N Farmanbar, SM Mousavizade, M Elsa and HR Ezatpour. AA5052 sheets welded by protrusion friction stir spot welding: High mechanical performance with considering sheets thickness at low dwelling time and tool rotation speed.
20. Specification for Automotive Weld Quality—Resistance Spot Welding of Aluminum .AWS D8.2M:2017 An American National Standard
- 21- Xiao Song & Liming Ke & Li Xing & Fencheng Liu & Chunping Huang Effect of plunge speeds on hook geometries and mechanical properties in friction stir spot welding of A6061-T6 sheets.
- 22- Y. Tozaki, Y. Uematsu, K. Tokaji , A newly developed tool without probe for friction stirspot welding and its performance , Journal of Materials Processing Technology 210, (2010).
- 23- 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, (2014).
- 24- Tran, V.-X., J. Pan, and T. Pan, Effects of processing time on strengths and failure modes of dissimilar spot friction welds between aluminum 5754-O and 7075-T6 sheets. Journal of materials processing technology, (2009).
- 25- Ashu Garg, Anirban Bhattacharya," On lap shear strength of friction stir spot welded AA6061 alloy" Journal of Manufacturing Processes, (2017).
- 26- Yutaka S. Sato, Mitsunori Urata, And Hiroyuki Kokawa Parameters Controlling Microstructure And Hardness During Friction-Stir Welding Of Precipitation-Hardenable Aluminum Alloy 6063, (2002).
- 27- R.S. Florea ,K.N. Solanki Resistance spot welding of 6061-T6 aluminum: Failure loads and deformation. Materials and Design, (2011).
- 28- J. L. Searles, P. I. Gouma, and R. G. Buchheit, "Stress Corrosion Cracking of Sensitized AA5083 (Al-4.5Mg-1.0Mn)", Metallurgical and Materials Transaction A, vol. 32 (11), pp. 2859-2867, (2001).
- 29- R. G. Buchheit, "A Compilation of Corrosion Potentials Reported for



Intermetallic Phases in Aluminium Alloys", Journal of the Electrochemical Society, 142 (11), pp. 3994-3996, (1995).

30- J. F. Guo , H. C. Chen, C. N. Sun, G. Bi, Z. Sun, J. Wei, Friction stir welding of dissimilar material between AA6061 and AA7075 Al alloys effects of process parameters, Materials and Design, Vol. 56, pp. 185-192, (2014).

31- Olea, C., et al., A sub-structural analysis of friction stir welded joints in an AA6056 Al-alloy in T4 and T6 temper conditions. Materials Science and Engineering: A, 9, (2007).

32- R. S. Mishra & Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing", Materials Science and Engineering, Vol. 50R, pp. 1-78, (2005).

33- D.A. Wang a,\*, S.-C. Lee b, Microstructures and failure mechanisms of friction stir spotwelds of aluminum 6061-T6 sheets

34- S. T. Amancio-Filho, S. Sheikhi, J. F. dos Santos, C. Bolfarini, Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminum alloys 2024-T351 and 6056-T4, materials processing technology, (2007).

35- Y. Tozaki, Y. Uematsu, and K. Tokaji, "Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys," Int. J. Mach. Tools Manuf., vol. 47, no. 15, pp. 2230–2236, (2007).

36- H. Lee and M. Lee, Process optimisation and microstructural evolution of friction stir spot-welded Al6061 joints, (2016).

37- Choi, D.-H., et al., Effect of pin shapes on joint characteristics of friction stir spot welded AA5J32 sheet. Materials transactions, (2010).

38- W. Yuan , R. Mishra. Effect of tool design and process parameters on properties of Al alloy 6016 friction stir spot welds. (2011).

