

## تأثیر سرعت دورانی در جوشکاری اصطکاکی اختلاطی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لبه روی هم آلیاژ AA5456

محمدعلی صفرخانیان\*

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران.

\*عهده‌دار مکاتبات: [m.a.safarkhanian@gmail.com](mailto:m.a.safarkhanian@gmail.com)

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۸)

**چکیده:** فرآیند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی، روش اتصال حالت جامدی است که بسیاری از عیوب رایج در روش‌های ذوبی را ندارد. در این فرآیند برای ایجاد جوش بهینه باید پارامترهای مختلف جوشکاری از جمله هندسه ابزار، سرعت دورانی و سرعت پیش‌روی بهینه گردد. هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر سرعت دورانی جوشکاری اصطکاکی اختلاطی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لبه روی هم آلیاژ AA5456 در حالت دوار است. بدین منظور، نمونه‌ها با سرعت‌های دورانی ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ دور بر دقیقه و سرعت جوشکاری ۴۵ میلی‌متر بر دقیقه جوشکاری شدند. به طوری که ورق کار سرد شده H۳۲۱ با ضخامت ۵ میلی‌متر بر لوله‌ی آنبیل شده به ضخامت ۲/۵ میلی‌متر در حالت Lap joint قرار داده شدند. در ابتدا درشت ساختار و ریزساختار مقطع جوش توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترون روبشی مورد بررسی قرار گرفت. سپس پروفیل سختی و آزمون کشش نمونه‌ها به دست آمد و با یکدیگر مقایسه گردید. در نهایت سطح مقطع شکست برای تعدادی از نمونه‌ها، توسط میکروسکوپ الکترون روبشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی‌های درشت ساختاری و ریزساختاری نشان می‌دهد که افزایش سرعت دورانی سبب افزایش سیلان عمودی مواد، ارتفاع عیب هوک و اندازه دانه در دکمه جوش و همچنین ریز شدن رسوبات می‌گردد و بالعکس. با افزایش سرعت دورانی سختی جوش کاهش ولی عرض ناحیه جوش افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج، نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۷۰۰ دور بر دقیقه دارای جوش بسیار تمیز و بدون عیب است که در آزمون کشش از فلز پایه شکسته می‌شود.

### واژه‌های کلیدی:

جوشکاری اصطکاکی اختلاطی لبه روی هم آلیاژ آلومینیم AA5456، سرعت دورانی ابزار، خواص مکانیکی، ریزساختار.

### ۱- مقدمه

فرآیند اتصال حالت جامد است که ریزساختار فلز جوش حاصل تبلور مجدد است [۳]. شکل (۱) شماتیکی از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی را نشان می‌دهد. در این فرآیند یک ابزار در حال دوران در لبه اتصال قرار می‌گیرد و در طول خط جوش حرکت می‌کند. در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی تغییر شکل پلاستیک به همراه دمای بالا وجود دارد که این عوامل در منطقه اغتشاش یافته

گروه ۵۰۰۰ آلیاژهای آلومینیم با اینکه عملیات حرارتی پذیر نیستند ولی از استحکام بالایی برخوردارند. عنصر اصلی این گروه Mg است [۱]. روش جوشکاری اصطکاکی اختلاطی کاربردهای گسترده‌ای در اتصال دهی اکثر آلیاژهای آلومینیوم پیدا کرده است [۲]. جوشکاری اصطکاکی اختلاطی یک

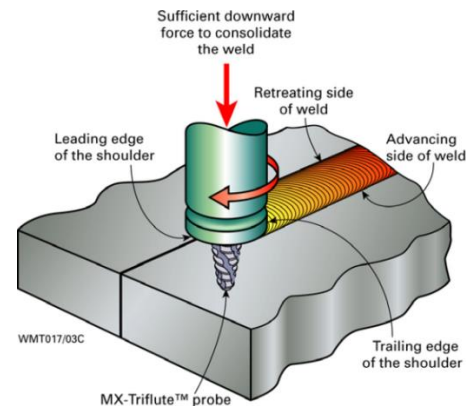
سبب کاهش عرض دکمه جوش می‌شود. عیب تونلی در آزمون غیر مخرب رادیوگرافی (RT) به راحتی قابل‌ردیابی بوده درحالی‌که عیب نقص پیوند و هوک در آزمون RT به‌سختی تشخیص داده می‌شود و یا تشخیص داده نمی‌شود. عیوب فوق باعث کاهش استحکام اتصال می‌گردند. هدف از این پروژه، مطالعه و بررسی اثر هندسه ابزار و گام جوش بر روی سیلان ماده منطقه‌ی اختلاط یافته و نیز مطالعه‌ی تشکیل و بهبود عیوب هوک و نقص پیوندی است. سه پارامتر اصلی و تأثیرگذار بر این فرایند، هندسه ابزار و همچنین سرعت‌های دورانی و پیشروی ابزار جوشکاری هستند.

هدف از این پژوهش، مطالعه و بررسی اثر پارامتر سرعت دورانی بر روی ریزساختار و خواص کششی آلیاژ AA۵۴۵۶ جهت تدوین مقدار بهینه به‌منظور کنترل ساختار و حصول خواص مکانیکی مناسب و پرهیز از عیوب ساختاری است. با انجام آزمایش‌های مکانیکی سختی سنجی و کشش برشی، تأثیر عیوب، نحوه سیلان مواد و ریزساختار بر پروفیل سختی، نیروی شکست و محل شکست نمونه‌ها مورد بررسی واقع شد و در نهایت پارامترهای بهینه جوشکاری که بهترین خواص مکانیکی را موجب می‌شوند به دست آمد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، دو ورق آلومینیوم ۵۴۵۶ با ضخامت ۵ و ۲/۵ میلی‌متر و طول و عرض 20cm و با تاریخچه عملیات حرارتی متفاوت استفاده گردید. ورق ۵ میلی‌متری کارسرد شده و ورق ۲/۵ میلی‌متری آنیل شده است. به دلیل نیاز صنعت، انتخاب آلیاژ، طرح اتصال و سابقه عملیات حرارتی متفاوت انجام شد. برای ساخت ابزار مخروطی با شیارهای ساعت‌گرد و سه شیار طولی (تری فلوت<sup>۴</sup>) از آلیاژ فولاد گرم کار H1۳ استفاده گردید. مشخصات ابزار مورد استفاده در شکل (۲) و جدول (۱) نشان داده شده است.

منجر به تشکیل دانه‌های تبلور مجدد یافته می‌شود؛ هم‌چنین این عوامل موجب انحلال رسوب‌ها در منطقه اغتشاش یافته و اطراف آن می‌شود [۴].



شکل (۱) شماتیکی از فرآیند جوشکاری اصطکاکی

ابزار در این فرآیند دو عملکرد اصلی دارد؛ حرارت دادن به قطعه و سیلان ماده به منظور انجام اتصال. حرارت موضعی، ماده در اطراف پین را نرم می‌کند و حرکت دورانی و انتقالی ابزار ماده را از جلوی ابزار به عقب هدایت می‌کند. نتیجه این فرآیند، انجام اتصال در حالت جامد است. حین فرآیند، ماده در دمای بالا تحت تغییر شکل پلاستیک زیاد قرار می‌گیرد که این عمل منجر به تشکیل دانه‌های ریز هم‌محور تبلور مجدد یافته می‌شود. این ریزساختار ظریف موجب می‌شود که اتصال حاصل از این فرآیند خواص مطلوبی داشته باشد. با توجه به هندسه پین و نگهدارنده که طراحی متنوعی می‌توانند داشته باشند، توزیع دما و حرکت ماده می‌تواند بسیار پیچیده باشد و در نتیجه ریزساختار حاصله نیز متغیر خواهد بود [۳-۵].

سه نوع عیب اصلی در اتصال FSW مشاهده می‌شود [۷-۸]:

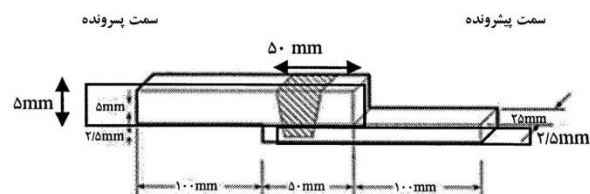
۱. عیب نقص پیوند<sup>۱</sup>
۲. عیب هوک<sup>۲</sup>
۳. عیب تونلی<sup>۳</sup>

دو عیب اول تنها مربوط به اتصال لبه روی هم است. عیب هوک منجر به نازک شدن ضخامت ورق شده و عیب نقص پیوند

بعد از انجام فرآیند جوشکاری آزمون رادیوگرافی طبق استاندارد ASME-SEC.8 Rev. 2004 روی نمونه‌ها انجام شد. به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها جهت بررسی‌های ریزساختاری، ابتدا سنباده‌زنی با سنباده ضد آب از مش ۸۰ تا ۳۰۰۰ صورت گرفت. سپس نمونه‌ها در محلول کلرز حکاکی شد.

جهت بررسی تأثیر تغییرات پارامترها بر روی درشت ساختار و عیوب ایجادشده، از سطح مقطع نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری مدل OLYMPUS BX 51 عکس گرفته شده است. برای بررسی‌های دقیق‌تر ریزساختار، میکروسکوپ الکترونی روبشی Tescan مدل Vega با ولتاژ ۳۰kV مجهز به EDS مورد استفاده قرار گرفت.

جهت بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها از آزمون‌های سختی سنجی و کشش استفاده شد. بعد از گرفتن عکس، طبق استاندارد ASTM E112 اندازه متوسط دانه‌ها در مرکز دکه جوش مشخص گردید. سپس از همان نقطه، آزمون ریز سختی ویکرز با نیروی ۲۰۰ گرم و زمان ۱۵ ثانیه توسط دستگاه BUHLER- MXT صورت پذیرفت. از دستگاه آزمون کشش Instron M200 با حداکثر نیروی ۲۰ تن و نرخ کرنش ۲ میلی‌متر بر دقیقه و دقت اندازه‌گیری ۰/۱ نیوتن استفاده گردید. ابعاد نمونه‌های آزمون کشش برشی مطابق شکل (۴) بر اساس استاندارد AWS D17.3 تهیه شد.



شکل (۴) ابعاد نمونه آزمون کشش برشی طبق استاندارد AWS D17.3.

جهت بررسی سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش و تعیین نوع شکست از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با الکترون ثانویه در حالتی که نمونه‌ها از فلز پایه، عیب هوک،

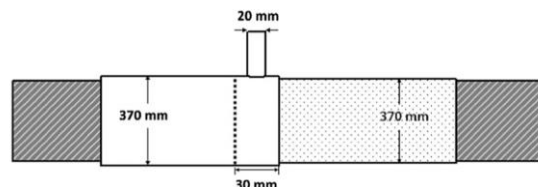


شکل (۲): ابزار جوشکاری شامل: نگهدارنده، شانه و پین.

جدول (۱): مشخصات ابزار مورد استفاده برای انجام فرآیند.

ارتفاع پین	کمترین قطر پین	بیشترین قطر پین	گام پین	عمق رزوه	قطر شانه
۷ mm	۵ mm	۷ mm	۰/۸mm	۰/۴mm	۲۰ mm

لوله با ضخامت ۵ میلی‌متری کارسرد شده H۳۲۱ بر لوله به ضخامت ۲/۵ میلی‌متری آنیل شده به صورت استوانه‌های تودرتو محیط شده و سپس توسط سه‌نظام به دستگاه جوشکاری متصل شدند که در شکل (۳) به صورت شماتیک نشان داده شده است و سپس توسط دستگاه جوشکاری FSW-linear400 جوشکاری شدند. به طوریکه لوله در حال چرخش و ابزار جوشکاری ثابت بود. زاویه انحراف جهت انجام فرآیند ۳ درجه انتخاب شد. سرعت ورود ابزار به قطعه کار ۳۵ میلی‌متر بر دقیقه و مدت زمان توقف ابزار در قطعه کار ۵ ثانیه بود. حرکت دورانی ابزار به صورت پادساعتگرد انتخاب شد و نمونه‌ها با سرعت‌های ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ دور بر دقیقه و با سرعت پیش‌روی ثابت ۴۵ میلی‌متر بر دقیقه جوشکاری شدند.



شکل (۳): شماتیک نمونه جوشکاری شده.

### ۳-۲- خواص مکانیکی فلزات پایه

جدول ۳- خواص مکانیکی هر دو ورق را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۳ استحکام آلیاژ کارسرد شده بیشتر از استحکام آلیاژ آنیل شده است. نیروی شکست ورق ۲/۵ میلی‌متری تقریباً معادل ۲۰,۰۰۰kN می‌باشد. در بررسی خواص مکانیکی جوشکاری اصطکاکی اختلاطی لبه روی هم نیروی شکست از اهمیت بیشتری نسبت به استحکام دارد.

جدول (۳): خواص مکانیکی فلز پایه.

سختی (BHN)	ازدیاد طول (%)	استحکام تسلیم (Mps)	استحکام کششی (Mps)	
۸۰	۱۹	۲۱۲	۳۲۶	ورق ۲/۵ mm
۱۰۲	۱۳	۲۷۷	۳۸۶	ورق ۵ mm

### ۳-۳- بررسی عیوب جوش

بعد از انجام بازرسی چشمی اولیه و بررسی نتایج آزمون متالوگرافی، عیب تونل تنها در نمونه جوشکاری شده با 300 rpm مشاهده شد. باید به این نکته توجه کرد که عیوب رایج در اتصال لبه روی هم نظیر نقص پیوند تماسی و هوک تنها در آزمون متالوگرافی مشاهده می‌شوند. شکل ۵ تصویر درشت ساختار مقطع نمونه‌های جوشکاری شده با مقادیر مختلف سرعت دورانی را نشان می‌دهد.

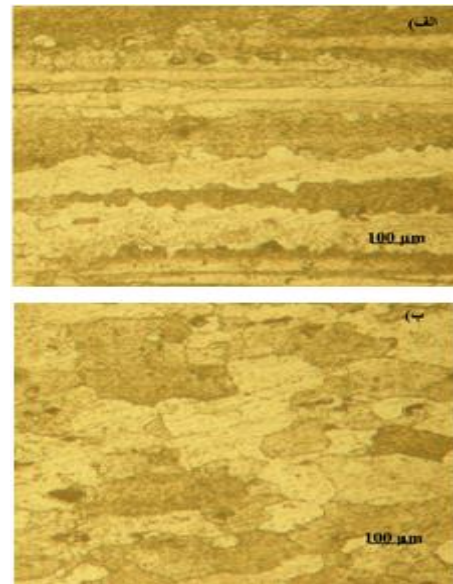
با توجه به اشکال نحوه سیلان مواد در داخل دکه جوش، تأثیر پارامترهای جوشکاری بر سیلان و ایجاد عیوب ظاهری قابل مشاهده است. برای سیلان مواد مدل‌های مختلفی پیشنهاد شده است که در یکی از آن‌ها برای شکل‌گیری دکه جوش بیان می‌شود که مواد سطحی از سمت پس‌رونده به ناحیه‌ی پلاستیک شده‌ی اطراف پین اکستروود می‌شوند [۶-۷].

عیب نقص پیوند تماسی و عیب حفره شکسته بودند، آزمایش به عمل آمد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ریزساختار پیش از انجام فرآیند

در شکل (۵) ریزساختار آلیاژهای مورد استفاده نشان داده شده است.



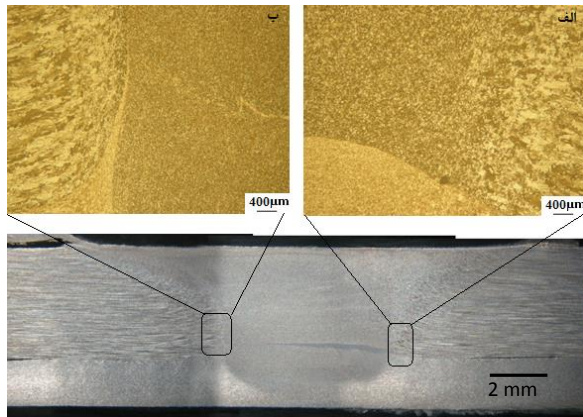
شکل (۵) ریزساختار آلیاژهای مورد استفاده الف) ریزساختار آلومینیوم H۳۲۱ - ۵۴۵۶، ب) ریزساختار آلومینیوم O - ۵۴۵۶.

ورق کارسرد استفاده شده دارای ریزساختار کشیده شده در جهت نورد است و در مقابل آلیاژ آنیل شده دارای ریزساختار هم‌محور است. این آلیاژ از گروه آلیاژهای هیپوئوتکتیک Al-Mg با درصد وزنی منیزیم تقریبی ۵ درصدی است که حاوی زمینه محلول منیزیم در آلومینیوم ( $\alpha$ ) و ترکیب بین‌فلزی  $Al_3Mg_2$  است. نتایج آنالیز اسپکتروفتومتری هر دو ورق ۲/۵ و ۵ میلی‌متری در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول (۲): ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶.

Al	Mg	Mn	Cu	Fe	Si	
Rest	۴/۷۹	۰/۵۰	۰/۰۲	۰/۱۸	۰/۱۲	ورق ۲/۵ mm
Rest	۴/۸۱	۰/۶۳	۰/۰۱	۰/۲۰	۰/۰۸	ورق ۵ mm

راستای فصل مشترک منحرف می‌شوند که این فصل مشترک‌های تغییر جهت یافته عیب هوک نامیده می‌شوند [۵]-۸. شکل (۷) تصاویر نمونه‌ای از عیب هوک را نشان می‌دهد.



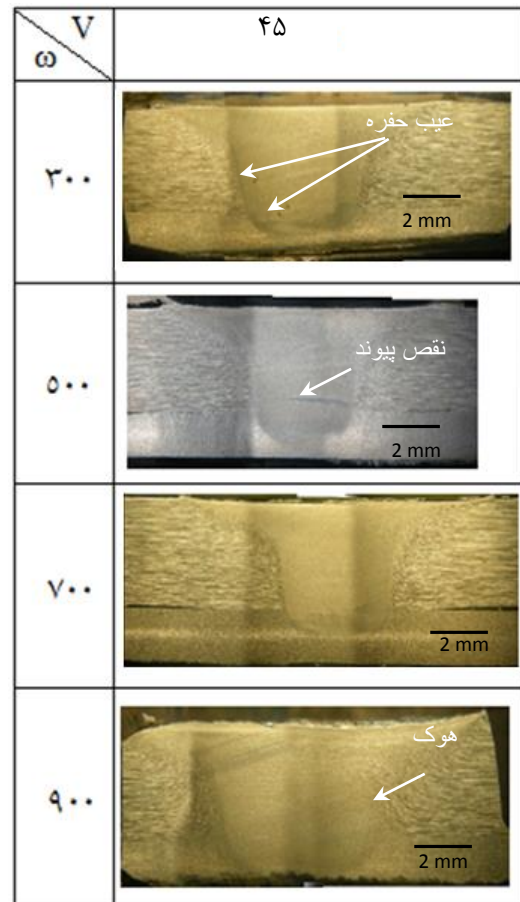
شکل (۷): تصویر عیب هوک در نمونه جوشکاری شده با پارامترهای rpm ۵۰۰ (الف) سمت پس‌رونده و (ب) سمت پیش‌رونده.

جهت کشیده شدن عیب هوک (به سمت بالا یا پایین) تابع سیلان مواد است که در این حالت هندسه پین و جهت حرکت دورانی ابزار بسیار تأثیرگذار است [۵]. در مورد عیب هوک بایستی به ارتفاع هوک توجه کرد [۹].

خواص مکانیکی جوش حاصل بسیار متأثر از پارامتر ارتفاع هوک است. با توجه به درشت ساختار جوش‌های انجام شده، در یک سرعت پیش‌روی ثابت با افزایش سرعت دورانی در هر دو سمت پیش‌رونده و پس‌رونده، جهت‌گیری، شکل و ارتفاع عیب هوک تغییر می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به نحوه‌ی سیلان مواد، مقدار کرنش وارده و دمای جوش نسبت داد [۱۰].

### ۳-۵- عیب نقص پیوند

این عیب در داخل دکمه جوش به صورت خط سیاه ظاهر می‌شود. درشت ساختار و ریزساختار عیب نقص پیوندی در شکل (۸) نشان داده شده است. عیب نقص پیوند به احتمال زیاد باقی‌مانده لایه اکسیدی موجود در فصل مشترک قطعه کار است که به دلیل تغییر شکل ناکافی در فصل مشترک شکسته نشده



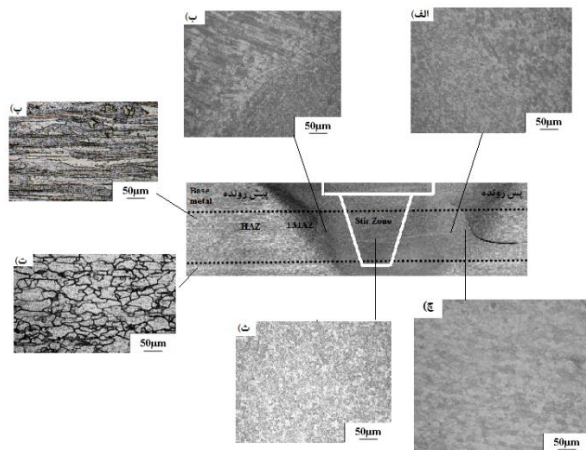
شکل (۶): تصاویر میکروسکوپی حاصل از مقطع نمونه‌های جوشکاری شده.

پین استفاده شده در این پژوهش دارای رزوه‌های راستگرد و جهت دوران ابزار (شانه و پین) پادساعتگرد است، لذا مواد کنده شده از سمت پیش‌رونده به دلیل رزوه‌های راستگرد علاوه بر حرکت افقی (به علت چرخش ابزار) حرکت عمودی نیز انجام می‌دهند. سیلان مواد تحت تأثیر پارامترهای فرآیند جوشکاری است و این نحوه‌ی سیلان است که میزان حرارت ورودی، تشکیل ترکیبات بین‌فلزی، اندازه دانه، شکل‌گیری عیوب را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

### ۳-۴- عیب هوک

این عیب تحت تأثیر عملیات مکانیکی ابزار ایجاد می‌شود. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود سطوح فداشونده دچار تغییر شکل می‌شوند و از جهت صاف و مستقیم خود در

[۱۰]. تغییرات اندازه دانه ناشی از حرارت ورودی است که سبب درشت شدن نسبی دانه‌ها می‌شود.

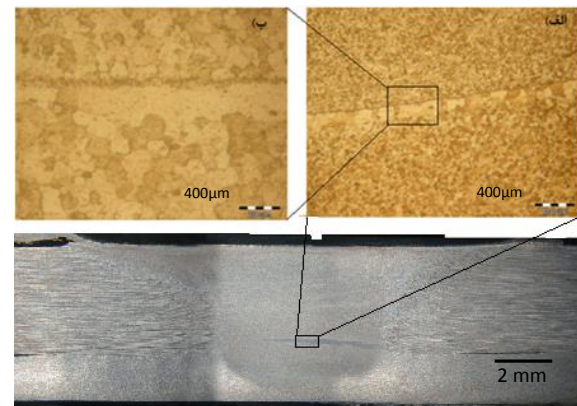


شکل (۹): ریزساختار نمونه جوشکاری شده با ۵۰۰rpm (الف) مرز بین دکمه جوش و ناحیه TMAZ سمت پس‌رونده، (ب) مرز بین دکمه جوش و ناحیه TMAZ سمت پیش‌رونده، (پ) ریزساختار فلز پایه کارسرد شده، (ت) ریزساختار فلز پایه آنیل شده، (ث) ریزساختار ناحیه اختلاط و (ج) ریزساختار TMAZ.

مرز بین دکمه جوش و ناحیه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی در سمت پیش‌رونده کاملاً مشخص است (شکل ۹ الف و ب) درحالی‌که در سمت پس‌رونده واضح نیست [۱۱]. حرکت دورانی ابزار ماده را در این سمت از فلز پایه جدا می‌کند درحالی‌که در سمت پس‌رونده ماده فقط رسوب می‌کند. در نتیجه‌ی این نوع از سیلان ماده (توسط ابزار) در سمت پس‌رونده مرز مشخص و واضحی مشاهده نمی‌شود.

کرنش پلاستیک و گرمای کمتری نسبت به دکمه جوش بر ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی (شکل ۹ ب) وارد می‌شود [۵]. ساختار دانه‌ها در ناحیه تحت تأثیر فرآیند ترمومکانیکی نسبت به فلز پایه متفاوت است. با توجه به شکل، در اثر اختلاط عمودی حاصل از دوران ابزار، دانه‌هایی که در فلز پایه در جهت نورد کشیده شده بودند، به سمت بالا کشیده شده‌اند. در ورق آنیل شده نیز کشش دانه‌ها به سمت بالا در این ناحیه مشاهده می‌شود. بالاترین دما و تغییر شکل را دکمه جوش

است. با انتخاب مناسب پارامترهای فرآیند می‌توان در جوش اختلاط و کرنش کافی ایجاد کرد و باعث شکسته شدن این فیلم اکسیدی شد [۵].



شکل (۸): عیب نقص پیوندی ۵۰۰ rpm، الف) درشت ساختار و ب) ریزساختار.

### ۳-۶- عیب حفره

عیب حفره نمایانگر عدم همگرایی جریان مواد در هر ناحیه است. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده شد این عیب در سرعت دورانی کم (۳۰۰ دور بر دقیقه) در سمت پیش‌رونده مشاهده می‌شود. هنگام جوشکاری با سرعت چرخشی کم و که دمای قطعه کار زیاد بالا نمی‌رود و به اصطلاح فرآیند به صورت سرد انجام می‌شود، حفرات کرمی شکل یا عیب عدم یکی شدن رخ می‌دهد و باعث کاهش استحکام استاتیکی جوش می‌شود. این عیب می‌تواند به خاطر پر نشدن فلز جوش در سمت پیش‌رونده باشد.

### ۳-۷- بررسی ریزساختار، اندازه دانه و توزیع رسوبات

#### نمونه‌های جوشکاری شده

#### ۳-۷-۱- ریزساختار

شکل (۹) ریزساختار نواحی مختلف ایجادشده در یکی از نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در ورق کار سرد شده، ریزساختار ناحیه تحت تأثیر حرارت (HAZ) با فلز پایه تفاوت چندانی ندارد درحالی‌که منطقه متأثر از حرارت در ورق آنیل شده حاوی دانه‌های هم‌محور و درشت‌تر نسبت به فلز پایه است

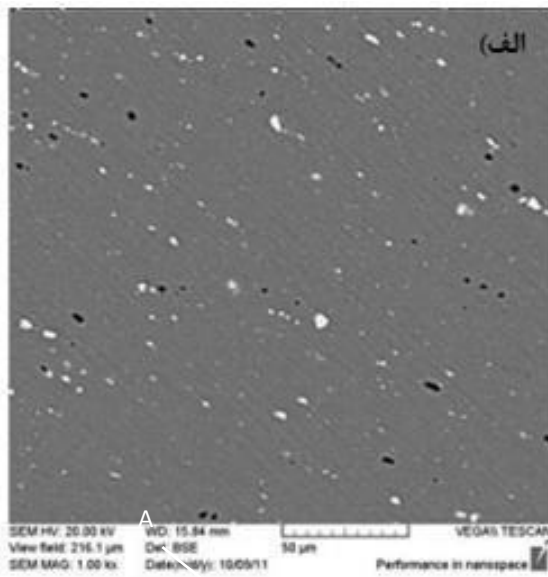
پیدا می کنند [۱۶]. هال پیچ رابطه بین سختی و اندازه دانه را به این صورت بیان می کند:

$$Q = H_0 + k_H d^{-1/2}$$

که در آن  $H_v$  سختی دکمه جوش،  $d$  (μm) اندازه دانه و  $H_0$  و  $k_H$  ثابت های معادله هستند. براساس این رابطه، با افزایش اندازه دانه، سختی معادل آن کاهش می یابد [۱۷]. بر اساس رابطه هال پیچ بایستی با کاهش اندازه دانه، سختی معادل افزایش یابد.

### ۳-۷-۳- توزیع رسوبات

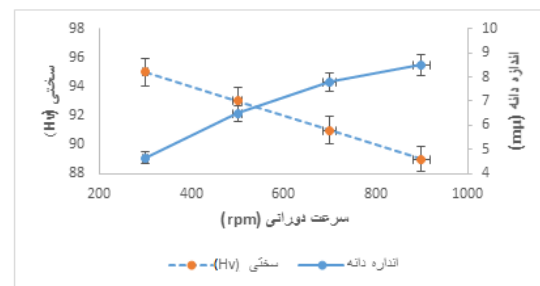
در حین فرایند جوشکاری، بر اثر حرکت دورانی ابزار، رسوب های موجود در فلز پایه تکه تکه می شوند و در سرتاسر دکمه جوش پراکنده می شوند. شکل (۱۱)، ریزساختار میکروسکوپ الکترونی رویشی با الکترون برگشتی از سطح مقطع دکمه جوش دو نمونه rpm ۵۰۰ و rpm ۹۰۰ را نشان می دهد. با توجه به آنالیز شیمیایی EDX (شکل ۱۲) ذرات قابل رویت نقطه A در شکل (۱۱) شامل عناصر AL، Mn، Fe و Mg است.



تجربه می کند (شکل ۹ ث). با توجه به مرجع حداکثر دمای ایجاد شده در مرکز جوش توسط فرآیند اصطکاکی اختلاطی برای آلیاژهای سری ۵xxx به بیشتر از ۵۵۰ درجه سانتی گراد نمی رسد [۱۲].

### ۳-۷-۲- اندازه دانه و سختی در دکمه جوش (اختلاط)

در برخی منابع [۱۳] گفته شده که اندازه دانه در ناحیه اغتشاش یافته (دکمه جوش) حداقل ۱۰ برابر کوچکتر از فلز پایه است [۱۴]. به دلیل کار مکانیکی شدید و دمای بالا حین فرآیند، مواد در دکمه جوش متبلور شده و منجر به تولید دانه های ریز و هم محور می گردد [۱۵]. در پژوهش حاضر ورق آئیل به ورق کارسرد شده H۳۲۱ جوش داده شده است، لذا تعیین دقیق مکانیزم دقیق تبلور مجدد دینامیکی در دکمه جوش بسیار دشوار است که پژوهش دیگری را می طلبد. شکل (۱۰) تغییرات اندازه دانه مرکز دکمه جوش و مقدار سختی همان نقطه را بر اثر تغییر سرعت دورانی در سرعت پیشروی ثابت ۴۵ میلی متر بر دقیقه نشان می دهد.



شکل (۱۰): تغییرات سختی و اندازه دانه مرکز جوش بر اثر تغییر سرعت دورانی در سرعت پیشروی ثابت (۴۵ mm/min).

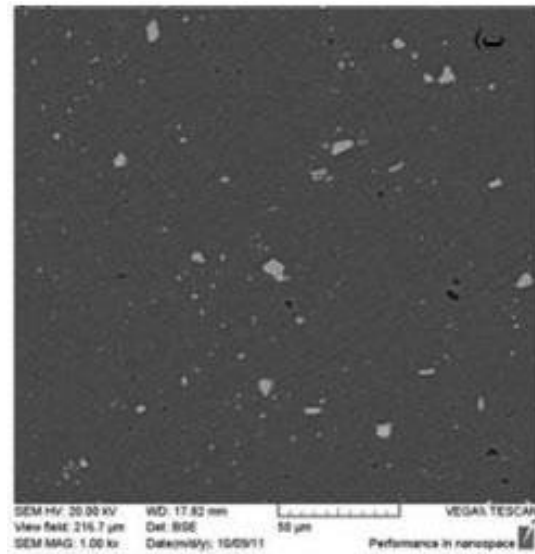
با توجه به شکل با افزایش سرعت دورانی، اندازه دانه افزایش یافته و سختی کاهش می یابد. اندازه دانه تحت تأثیر حرارت ورودی ناشی از اصطکاک ابزار قرار دارد به طوری که افزایش حرارت ورودی منجر به افزایش دمای دانه های متبلور شده می گردد و در نتیجه دانه ها با بالا رفتن دمای جوش رشد بیشتری

اتصال لبه روی هم ورق‌های با ضخامت متفاوت، خواص مکانیکی بیشتر تحت تأثیر عیوب و نحوه سیلان مواد در دکمه جوش است.

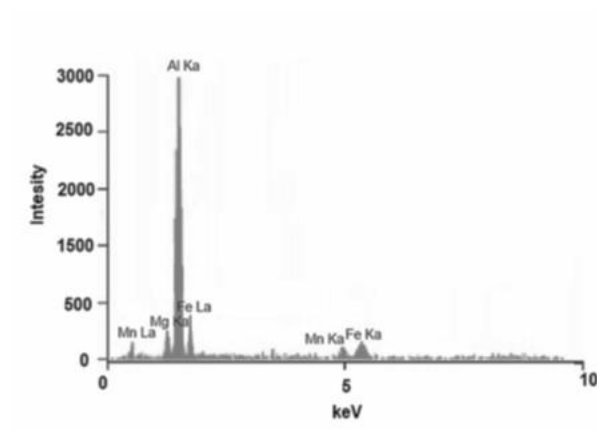
جدول (۶): نتایج حاصل از آزمون کشش.

محل شکست	نیروی شکست (N)	سرعت دورانی (rpm)	نمونه
از دکمه جوش جدا شده	۷۸۰۰	۳۰۰	۱
از دکمه جوش جدا شده	۵۴۰۰	۵۰۰	۲
فلز پایه ۲/۵ میلی متری	۲۰۲۶۰	۷۰۰	۳
فلز پایه ۵ میلی متری	۱۵۳۰۰	۹۰۰	۴

ارتفاع عیب هوک، هم تراز با پارامتر ضخامت مؤثر ورق است. ضخامت مؤثر ورق؛ ضخامت ورق اندازه‌گیری شده از طریق اندازه‌گیری کوچکترین فاصله بین فصل مشترک اتصال نیافته و بالای ورق بالایی است (شکل ۱۳) [۱۹-۲۱]. در حقیقت در صورت عدم وجود عیب هوک، به دلیل نازک تر بودن ورق پایینی، قطعاً شکست از دکمه جوش و از سمت ورق پایینی رخ می‌داد. با بهینه‌سازی عیب هوک می‌توان خواص مکانیکی اتصال لبه روی هم ورق‌های با ضخامت متفاوت را افزایش داد. در مورد ارتفاع عیب هوک می‌توان گفت که هرگاه ارتفاع عیب هوک به اندازه‌ای باشد که در دکمه جوش EST از هر دو سمت یکسان باشد، می‌توان پیش‌بینی کرد که در صورت عدم وجود عیوب دیگر محل شکست در آزمون کشش برشی از دکمه جوش نخواهد بود. همانطور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است به دلیل سرعت دورانی بالا در نمونه جوشکاری شده با ۹۰۰ rpm و سیلان شدید مواد به سمت بالا مقدار EST تقریباً 2.5mm شده است.



شکل (۱۱): الف) تصویر ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی با الکترون برگشتی از سطح دکمه جوش الف) نمونه ۹۰۰ rpm و ب) نمونه ۵۰۰ rpm.



شکل (۱۲): آنالیز EDX ذرات مشاهده شده در شکل (۱۱)

### ۳-۸- خواص مکانیکی نمونه‌های جوشکاری شده

#### ۳-۸-۱- آزمون کشش برشی

نتایج حاصل از آزمون کشش برش برای نمونه‌های جوشکاری شده با پین ۷ میلی‌متر در جدول ۶ نشان داده شده است. در حالت کلی، وجود عیوبی همچون عیب تونلی، عیب هوک، نقص پیوند تماسی و عیب حفره در فلز جوش سبب می‌گردد که خواص مکانیکی به شدت افت کند. به نظر می‌رسد در



اصطلاح فرآیند به صورت سرد انجام می شود، حفرات کرمی شکل یا عیب عدم یکی شدن رخ می دهد و باعث کاهش استحکام استاتیکی جوش می شود این عیب می تواند به خاطر پر نشدن کافی ناحیه اول در سمت پیش رونده باشد. وجود عیب هوک شدید در نمونه جوشکاری با سرعت دورانی ۹۰۰ rpm سبب شد که EST حدود ۲/۵ mm شود و محل شکست از منطقه جوش و ورق ۵ میلی متری اتفاق بیافتد (شکل ۱۶).



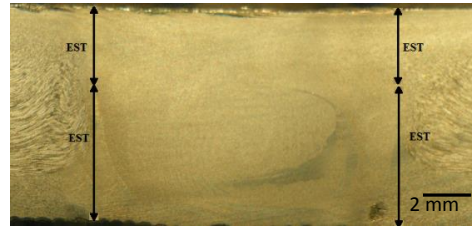
شکل (۱۵): محل شکست در نمونه جوشکاری شده با ۵۰۰ rpm



شکل (۱۶): محل شکست در نمونه جوشکاری شده با ۹۰۰ rpm

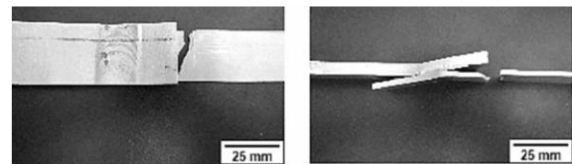
### ۹-۳-۹- پروفیل سختی

شکل (۱۷) و شکل (۱۸) به ترتیب تغییرات پروفیل سختی ورق ۵ میلی متری کار سرد شده و ورق ۲/۵ میلی متری آنیل شده را بر اثر تغییرات سرعت دورانی در سرعت پیشروی ثابت ۴۵ میلی متر بر دقیقه نشان می دهد. مطابق شکل ۱۷، با افزایش سرعت دورانی، سختی دکمه جوش کاهش می یابد. علت این کاهش، درشت شدن دانه های متبلور شده دکمه جوش به دلیل افزایش گرمای ورودی فرایند در اثر افزایش سرعت دورانی است.



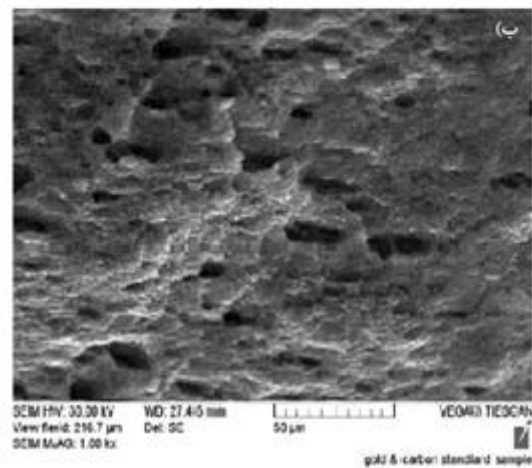
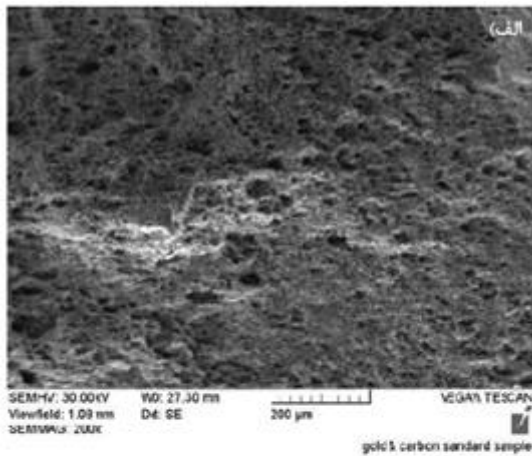
شکل (۱۳): ضخامت مؤثر ورق (EST) در دو ورق برای نمونه ۹۰۰ rpm

عیب هوک، ضخامت مؤثر ورق پایینی را افزایش می دهد و سطح بیشتری از جوش، نیروی مکانیکی وارد شده را تحمل می کند. همانطور که در شکل (۱۴) مشاهده می شود به دلیل وجود عیب هوک در نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۷۰۰ rpm باعث EST در حد ۴ میلی متر شده است که در این شرایط شکست از محل جوش اتفاق نیفتاد.



شکل (۱۴): محل شکست در نمونه جوشکاری شده با ۷۰۰ rpm

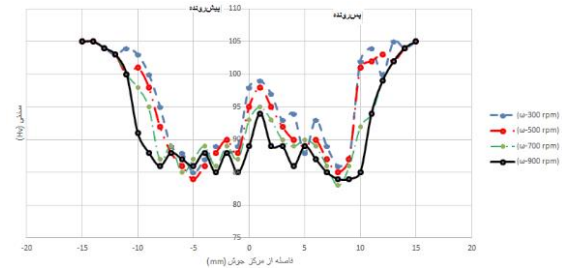
در نمونه جوشکاری شده با ۵۰۰ rpm علاوه بر عیب هوک عیب نقص پیوندی نیز مشاهده می شود. در نتیجه این عیب، نمونه تحت کشش از محل جوش به کلی جدا می شود (شکل ۱۵). عیب نقص پیوندی در این حالت به احتمال زیاد از کافی نبودن سرعت دورانی در شکستن اکسیدهای سطحی می باشد. با افزایش بیشتر سرعت دورانی، لایه ها شکسته شده و عیب نقص پیوندی محو می شود. نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۳۰۰ rpm نیز از جوش جدا شد. با توجه به تصاویر متالوگرافی، این نمونه علاوه بر عیب نقص پیوند دارای عیب حفره نیز بوده که محل تمرکز تنش می باشد. لذا تحت آزمون کشش این حفرات رشد کرده و به هم پیوسته و در نهایت باعث جدا شدن دو ورق از جوش شده اند. همان طور که در بخش های قبلی گفته شده است، در هنگام جوشکاری با سرعت چرخشی کم و سرعت پیشروی بالا که دمای قطعه کار زیاد بالا نمی رود و به



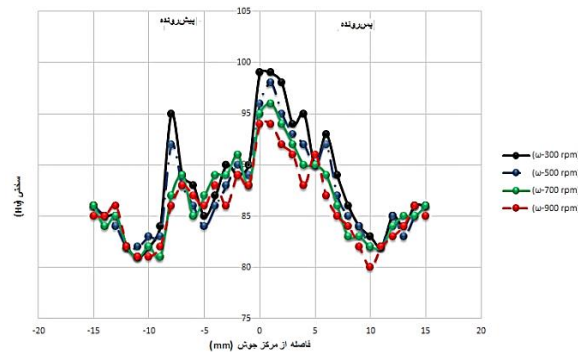
شکل (۱۹): تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی از سطح شکست آزمون کشش نمونه جوشکاری شده با ۷۰۰ rpm (الف) بزرگنمایی ۲۰۰X و (ب) بزرگنمایی ۱۰۰۰X.

مطابق شکل، این نمونه از فلز پایه ورق ۲/۵ میلی متری آنیل، شکست خورده است. در شکل فوق، ریز حفرات هم محور قابل مشاهده هستند. البته کل سطح نمونه حاوی ریز حفرات هم محور و هموزن نیست. لذا به نظر می رسد شکست این نمونه نوعی شکست مختلط باشد. به گونه ای که هم شکست نرم و هم شکست ترد در نمونه مشاهده می گردد.

شکل (۲۰) تصویر محل شکست و همچنین تصاویر گرفته شده نگاری آزمون کشش نمونه ۳۰۰ rpm را نشان می دهد. این نمونه به دلیل وجود عیب حفره بسیار ریز در امتداد فصل مشترک در سمت پیش رونده به طرف ورق پایین شکسته است.



شکل (۱۷): تغییرات پروفیل سختی ورق ۵ میلی متری کار سرد شده بر اثر تغییرات سرعت دورانی



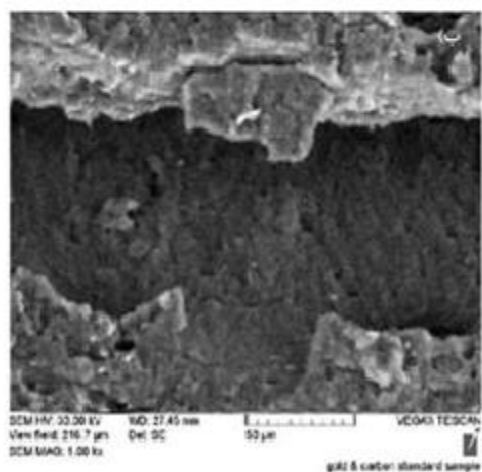
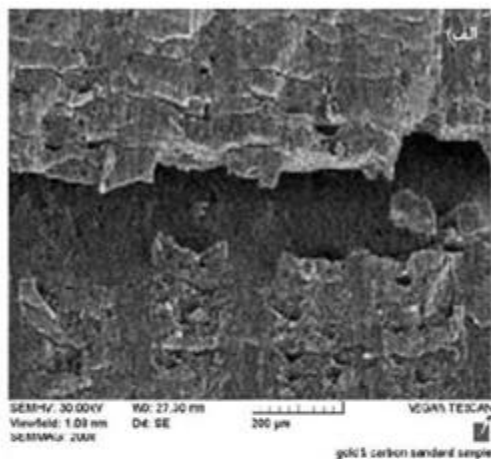
شکل (۱۸): تغییرات پروفیل سختی ورق ۲/۵ میلی متری آنیل شده بر اثر تغییرات سرعت دورانی.

تغییرات سختی بر اثر افزایش سرعت دورانی در ورق آنیل شده نیز همانند ورق کار سرد شده است، با این تفاوت که این تغییرات به نسبت کمتر هستند. در شکل (۱۸)، سختی دکمه جوش با افزایش سرعت دورانی کاهش می یابد. کاهش سختی دکمه در اثر افزایش سرعت دورانی به این دلیل است که افزایش گرمای ورودی و به دنبال آن افزایش دمای فرایند، سبب می شود که در حین تبلور مجدد دینامیکی، دانه ها رشد بیشتری داشته باشند. همانند ورق کار سرد شده، پهنای متأثر از حرارت در نمونه های با سرعت دورانی بالاتر بیشتر است.

### ۳-۱۰- شکست نگاری

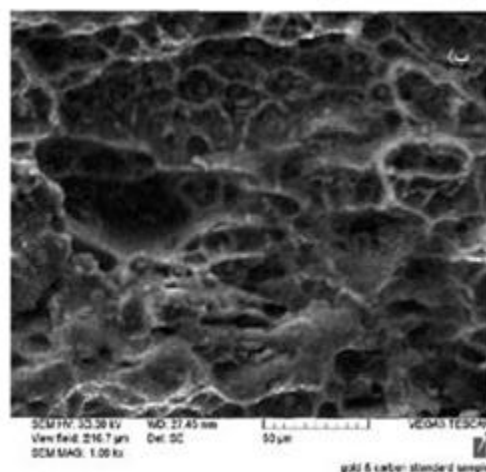
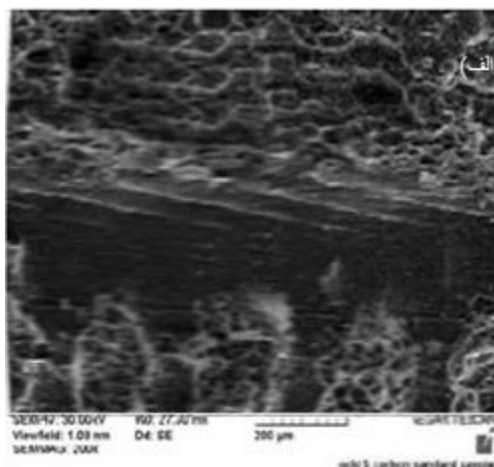
شکل (۱۹) تصویر محل شکست و همچنین تصاویر گرفته شده با الکترون ثانویه میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه کشش جوشکاری شده با ۷۰۰ rpm را نشان می دهد.

در قسمت پایین تصویر مربوط به عیب حفره می باشد که ریز حفرات مشاهده شده در آن، محل برخورد شیارهای تعبیه شده روی پین با داخل عیب حفره است. در قسمت بالای تصویر، سطح شکست مربوط به فلز پایه ۵ میلی متری می باشد که وجود ریز حفراتی به نسبت هموزن و هم محور در تصویر کاملاً مشهود است.



شکل (۲۱): تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی از سطح شکست آزمون کشش نمونه جوشکاری شده با ۵۰۰ rpm (الف) بزرگنمایی ۲۰۰X و (ب) بزرگنمایی ۱۰۰۰X.

مطابق شکل (۲۱) شکست در داخل دکه جوش اتفاق افتاده است؛ به گونه ای که دو ورق به طور کامل در راستای فصل مشترک از هم جدا شده اند. دلیل این شکست وجود عیب نقص پیوند تماسی در صفحه فصل مشترک می باشد. ناحیه وسط تصویر شکست نگاری، تنها ناحیه ای می باشد که به نظر دو ورق در اثر فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی به یکدیگر متصل شده اند. به دلیل اینکه آزمون کشش در این نمونه کاملاً ماهیت برشی دارد، به نظر ریز حفرات در اثر ساییده شدن دو ورق بر روی هم از بین رفته اند.



شکل (۲۰): تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی از سطح شکست آزمون کشش نمونه جوشکاری شده با ۳۰۰ rpm (الف) بزرگنمایی ۲۰۰X و (ب) بزرگنمایی ۱۰۰۰X.

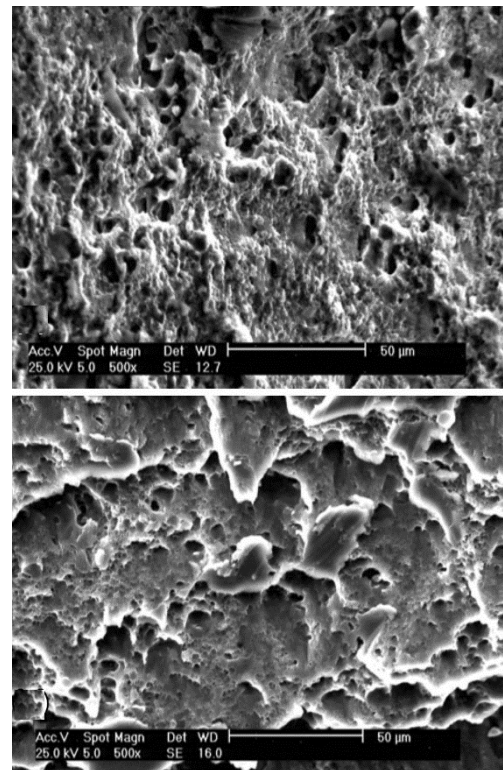
شکل (۲۱) تصویر محل شکست و همچنین شکست نگاری آزمون کشش نمونه جوشکاری شده با پارامتر ۵۰۰ rpm را نشان می دهد.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش اثر پارامتر سرعت دورانی جوشکاری اصطکاکی اختلاطی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لبه روی هم آلیاژ AA5456 تحت بررسی قرار گرفت که مهم ترین نتایج حاصل، عبارت اند از:

- ۱- افزایش سرعت دورانی سبب ایجاد عیب هوک در اتصال لبه روی هم می شود.
- ۲- جهت حرکت فصل مشترک و هوک تابعی از هندسه ابزار و یا تقابل راستگرد یا چپ گرد بودن شیارهای ابزار با جهت حرکت دورانی ابزار می باشد. در این پژوهش از آنجا که شیارهای تعیبه شده بر روی پین راستگرد و جهت دوران ابزار پادساعتگرد می باشد، جهت عیب هوک به سمت بالاست.
- ۳- دانه ها در دکمه جوش کاملاً هم محور می باشند و اندازه آن ها متناسب با متغیرهای جوشکاری، به طور میانگین بین ۴/۶۵ تا ۷/۸۹ میکرومتر تغییر می کند. در حقیقت دانه ها در این ناحیه بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی را تجربه می کنند.
- ۴- در اتصال لبه روی هم ورق های با ضخامت متفاوت، خواص مکانیکی بیشتر تحت تأثیر عیوب و نحوه سیلان مواد در دکمه جوش می باشد.
- ۵- به دلیل تفاوت در ضخامت ورق های جوشکاری شده در اتصال لبه روی هم، می توان از عیب هوک جهت نیل به خواص مکانیکی بهینه استفاده کرد.
- ۶- با توجه به نتایج آزمون های مختلف و متالوگرافی های انجام شده می توان ترکیب پارامتر rpm ۷۰۰ را به عنوان ترکیب پارامتر بهینه فرآیند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی در این پژوهش معرفی کرد.

شکل (۲۲) تصویر محل شکست و همچنین شکست نگاری آزمون کشش نمونه جوشکاری شده با پارامتر rpm ۹۰۰ را نشان می دهد.



شکل (۲۲): تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی از سطح شکست آزمون کشش نمونه جوشکاری شده با rpm ۹۰۰ الف) بزرگنمایی ۲۰۰X و ب) بزرگنمایی ۱۰۰۰X

محل شکست در این نمونه از ورق ۵ میلی متری اتفاق افتاده است همانطور که در قبل بیان شد علت این امر وجود عیب هوک شدید در ورق ۵ میلی متری می باشد. وجود عیب هوک سبب شده است که در کل سطح نمونه ریز حفرات هم محور و هموزن مشاهده نشود. لذا به نظر می رسد شکست این نمونه نوعی شکست مختلط باشد. به گونه ای که هم شکست نرم و هم شکست ترد در نمونه مشاهده می گردد.

## ۵- منابع و مراجع

- [11] C. Zhou, X. Yang & G. Luan, "Investigation of microstructures and fatigue properties of friction stir welded Al-Mg alloy", *Materials Chemistry and Physics*, vol. 98, pp. 285-290, 2006.
- [12] R. S. Mishra & Z. Ma, "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 50, pp. 1-78, 2005.
- [13] E. Cerri & P. Leo, "Mechanical properties evolution during post-welding-heat treatments of double-lap Friction Stir Welded joints", *Materials & Design*, vol. 32, pp. 3465-3475, 2011.
- [14] A. Etter, T. Baudin, N. Fredj & R. Penelle, "Recrystallization mechanisms in 5251 H14 and 5251 O aluminum friction stir welds", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 445, pp. 94-99, 2007.
- [15] J. Yang, B. Xiao, D. Wang & Z. Ma, "Effects of heat input on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Mg-3Al-1Zn alloy", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, pp. 708-714, 2010.
- [16] F. Fadaeifard, K. A. Matori, M. Toozandehjani, A. R. Daud, M. K. A. M. Ariffin, N. K. Othman & et al., "Influence of rotational speed on mechanical properties of friction stir lap welded 6061-T6 Al alloy", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 24, pp. 1004-1011, 2014.
- [17] T. Hirata, T. Oguri, H. Hagino, T. Tanaka, S. W. Chung, Y. Takigawa & et al., "Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 456, pp. 344-349, 2007.
- [18] M. Ericsson, L.-Z. Jin & R. Sandström, "Fatigue properties of friction stir overlap welds", *International journal of fatigue*, vol. 29, pp. 57-68, 2007.
- [19] G. Buffa, G. Campanile, L. Fratini & A. Prisco, "Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 519, pp. 19-26, 2009.
- [۲۰] م. نادری، م. ع. صفرخانیان، ا. ح. کویکی و ا. عبدالله زاده، "بررسی تأثیر هندسه ابزار بر خواص مکانیکی و شکل گیری عیوب رایج در اتصال لبه روی هم آلیاژهای آلومینیوم در فرآیند جوشکاری هم زن اصطکاکی"،
- [1] H. Shirazi, S. Kheirandish & M. A. Safarkhanian, "Effect of process parameters on the macrostructure and defect formation in friction stir lap welding of AA5456 aluminum alloy", *Measurement*, vol. 76, pp. 62-69, 2015.
- [2] E. Salari, M. Jahazi, A. Khodabandeh & H. G. Nanasa, "Friction stir lap welding of 5456 aluminum alloy with different sheet thickness: process optimization and microstructure evolution", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-10, 2015.
- [3] J. M. Piccini & H. G. Svoboda, "Effect of pin length on Friction Stir Spot Welding (FSSW) of dissimilar Aluminum-steel joints", *Procedia Materials Science*, vol. 9, pp. 504-513, 2015.
- [4] Y. Zhang, X. Cao, S. Larose & P. Wanjara, "Review of tools for friction stir welding and processing", *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 51, pp. 250-261, 2012.
- [5] X. Cao & M. Jahazi, "Effect of tool rotational speed and probe length on lap joint quality of a friction stir welded magnesium alloy", *Materials & Design*, vol. 32, pp. 1-11, 2011.
- [6] T. Saeid, A. Abdollah-Zadeh & B. Sazgari, "Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum-copper lap joints made by friction stir welding", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 490, pp. 652-655, 2010.
- [7] Z. Chen, T. Pasang & Y. Qi, "Shear flow and formation of Nugget zone during friction stir welding of aluminium alloy 5083-O", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 474, pp. 312-316, 2008.
- [8] L. Dubourg, A. Merati & M. Jahazi, "Process optimisation and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin", *Materials & Design*, vol. 31, pp. 3324-3330, 2010.
- [9] D. Fersini & A. Pirondi, "Analysis and modelling of fatigue failure of friction stir welded aluminum alloy single-lap joints", *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 75, pp. 790-803, 2008.
- [10] R. Fonda, P. Pao, H. Jones, C. Feng, B. Connolly & A. Davenport, "Microstructure, mechanical properties, and corrosion of friction stir welded Al 5456", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 519, pp. 1-8, 2009.

فصلنامه علمی و پژوهشی مواد نوین، دانشگاه مجلسی، دوره ۶، شماره ۲، ص ۱۹-۹، تابستان ۱۳۹۱.

فصلنامه علمی و پژوهشی مواد نوین، دانشگاه مجلسی، دوره ۱۱، شماره ۱، ص ۱۰-۱، بهار ۱۳۹۶.

### ۶- پی نوشت

[۲۱] م.ع. صفرخانیان، م. گودرزی و س.م.ع. بوتراپی، "مکانیزم تشکیل دانه ها در منطقه ی اختلاط حین جوشکاری اصطکاکی اختلاطی (FSW) و بررسی اثر سرعت دورانی ابزار و سرعت جوشکاری بر اندازه دانه ها"،

- [1] Kissing bound
- [2] Hooking
- [3] tunneling
- [4] Triflute

## Effect of Rotational Speed on Microstructure and Mechanical Properties of AA5456 Alloy Welded by FSW-Lap Joint

Mohammad Ali Safarkhanian \*<sup>1</sup>

1- Assis. Prof. Department of Materials Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

\*Corresponding author: m.a.safarkhanian@gmail.com

---

### Abstract

Friction stir welding process is solid state welding method that does not have many common defects in fusion methods. In this method for creating optimum weld, some parameters should be optimized, such as welding tool geometry, rotational speed and travel speed. The aim of this study was to investigate the effect of rotational speed on microstructure and mechanical properties of friction stir lap welding AA5456 in rotary state to optimize the parameter values. For this purpose, Welding process was performed in rotating state, rotating tool was plunged from the cold-worked tube (AA 5456-H321 with 5 mm thickness) surface into the surface of Annealed tube (AA 5456-O with 2.5 mm thickness) and lap joints were produced by rotational speeds of 300, 500, 700 and 900 rpm and welding speed of 45 mm/min. Macro and microstructure of weld cross sections by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM) were studied. Then the hardness profile and tensile shear test were obtained and compared to another. Finally the fracture surfaces of some samples were examined by using a scanning electron microscope (SEM). The Macro and microstructure results show that increasing of rotation speed, increases the vertical flow of material, the height of hook as well as fine-grained sediments in the nugget zone. Increasing the rotational speed, decreases hardness of weld nugget. The results of tensile shear test show that the welding parameter of (700 rpm- 45 mm/min) is the optimal combination of parameters in this study.

**Keywords:** Friction Stir Lap Welding, AA5456 Aluminium Alloy, Rotational Speed, Microstructure, Mechanical Properties.

---

Journal homepage: [ma.iaumajlesi.ac.ir](http://ma.iaumajlesi.ac.ir)

### Please cite this article using:

Mohammad Ali Safarkhanian, Effect of Rotational Speed on Microstructure and Mechanical Properties of AA5456 Alloy Welded by FSW-Lap Joint, New Process in Material Engineering, 2020, 14(4), 25-39.