

## تأثیر پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی بر خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصال لبه روی هم آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶

منصور مردعلی زاده<sup>۱\*</sup>، محمدعلی صفرخانین<sup>۲</sup>، محمدرضا سلیمانی یزدی<sup>۳</sup>  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۱۸، ش.ص: ۱۵۶-۱۴۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۱۰)

### چکیده

در این پژوهش بر پایه آزمایش‌های تجربی، فرایند اتصال‌دهی ورق‌های آلیاژی آلومینیوم ۵۴۵۶ در حالت لبه روی هم، به‌گونه‌ای که ورق کار سرد شده ۳۲۱ H با ضخامت ۵ میلی‌متر بر روی ورق آنیل با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر قرار می‌گیرد، صورت پذیرفت و تأثیر همزمان پارامترهای سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر خواص مکانیکی و متالورژیکی در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی مورد تحقیق قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت پیشروی ابزار (افزایش گام جوشکاری)، سبب افزایش حرارت ورودی، افزایش سیلان عمودی مواد، افزایش ارتفاع هوک و کاهش ضخامت مؤثر ورق شده و باعث می‌شود، شکست از منطقه ترمومکانیکال جایی که بیش‌ترین حرارت ورودی به آنجا وارد می‌شود اتفاق بیفتد و افزایش سرعت پیشروی، باعث کاهش میزان اختلاط مواد و کاهش ارتفاع هوک شده و سبب شکست فصل مشترکی می‌شود. با بررسی دقیق‌تر نتایج مشاهده گردید که به علت متفاوت بودن ضخامت ورق‌ها، وجود عیب هوک و ارتفاع و جهت‌گیری مناسب آن در این طرح اتصال مفید بوده و باعث افزایش استحکام شده و در آزمون کشش، سبب شکست از فلز پایه در ورق ۲/۵ میلی‌متر گردید.

**واژه‌های کلیدی:** جوشکاری اصطکاکی اختلاطی، آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶، اتصال لبه روی هم، خواص مکانیکی.

<sup>۱</sup> - دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری ساخت، تهران

<sup>۲</sup> - استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری ساخت، تهران

<sup>۳</sup> - دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه امام حسین (ع)، دانشکده مهندسی مکانیک، تهران

\*- نویسنده مسئول مقاله : [mmardalizadeh@yahoo.com](mailto:mmardalizadeh@yahoo.com)

## پیشگفتار

روش جوشکاری اصطکاکی اختلاطی<sup>۱</sup> جزء فرایندهای جوش حالت جامد است که در آن اتصال فلزات بدون هیچ‌گونه الکتروود پراکنده، منبع گرمایی و محیط خنثی صورت می‌پذیرد. این روش نوین جوشکاری در سال ۱۹۹۱ در موسسه جوشکاری<sup>۲</sup> [۱] برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم ابداع گشت. در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی، سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار دو پارامتر کلیدی هستند که میزان گشتاور ابزاری، نیروی اصطکاکی و در نتیجه استحکام کششی و عملکرد خستگی قطعه جوشکاری شده را تعیین می‌کنند [۲ و ۳].

در شکل ۱ تصویری از روش جوشکاری اصطکاکی اختلاطی نشان داده شده است. این فرایند با بستن ورق‌های فلزی روی صفحه‌ای که نگهدارنده نامیده می‌شود آغاز می‌گردد، سپس ورق‌ها باید با نیروی صفحه تقویتی<sup>۳</sup> به خوبی مهار شوند تا از حرکت آن‌ها در جهات مختلف حین جوشکاری جلوگیری به عمل آید. در این روش با تماس شانه ابزار<sup>۴</sup> با سطح کار در حین چرخش ابزار، حرارت تولید شده و حرکت دورانی بین سبب تغییر شکل شدید مواد در محل اتصال می‌شود. بدین ترتیب همراه با آمیخته شدن مواد از دو قطعه در حال اتصال و از بین رفتن خط اتصال، تبلور مجدد دینامیکی اتفاق می‌افتد. دانه‌های منطقه اتصال در این روش جوشکاری نسبت به روش‌های ذوبی که ستونی و درشت می‌باشند از ظرافت و یکنواختی مناسبی برخوردارند. در قطعات متصل شده با روش جوشکاری اصطکاکی اختلاطی می‌توان بر اساس تغییرات ایجاد شده در ریز ساختار، سه منطقه مجزا، منطقه اتصال<sup>۵</sup>، منطقه تحت تأثیر فرایند ترمومکانیکی<sup>۶</sup> و منطقه متأثر از حرارت<sup>۷</sup> تشخیص داد [۳].

فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی، علاوه بر اتصال لب به لب در بسیاری از کاربردهایی که اتصال لبه

روی هم یا ترکیبی از هر دو نوع اتصال نیاز می‌باشد، کاربرد دارد. فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی لبه روی هم در صنایع هوافضا<sup>۸</sup> جهت ساخت مخازن تحت فشار جدار نازک و مخازن ضد نشت آلومینیومی از قبیل باک‌های سوخت و محفظه‌های سر بسته مانند مبدل‌های حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴].

در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی در طرح اتصال لبه روی هم، مواردی مانند ضخامت مؤثر ورق<sup>۹</sup>، شکل فصل مشترک و حرکت ماده در داخل جوش به علت اینکه ورق‌ها روی هم قرار گرفته و بین آن‌ها فصل مشترک وجود دارد حائز اهمیت بوده و بر روی خواص مکانیکی اتصال تأثیرگذار می‌باشند [۵].

در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی با طرح اتصال لبه روی هم، در هر دو سمت پیش‌رونده و پس‌رونده ناحیه متأثر از ترمومکانیکال، سطوح بین ورق بالایی و پایینی دچار تغییر شکل شده و در راستای فصل مشترک منحرف می‌شوند، در واقع مواد در ناحیه متأثر از ترمومکانیکال و همچنین مرز دکه جوش با ناحیه متأثر از ترمومکانیکال، می‌توانند به سمت بالا و یا پایین فصل مشترک منحرف شوند. این فصل مشترک‌های منحرف‌شده عیب هوک<sup>۱۰</sup> نامیده می‌شوند. [۶ و ۷].

در این پژوهش بر پایه آزمایش‌های تجربی انجام‌گرفته در صنعت، فرایند اتصال دهی ورق‌های آلیاژی آلومینیوم ۵۴۵۶ در حالت لبه روی هم با روش جوشکاری اصطکاکی اختلاطی، به‌گونه‌ای که ورق کار سرد شده H۳۲۱ با ضخامت ۵ میلی‌متر بر روی ورق آنیل با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر قرار می‌گیرد، صورت پذیرفت و تأثیر همزمان پارامترهای کلیدی جوشکاری اصطکاکی اختلاطی (سرعت دورانی ابزار (ω) و سرعت پیشروی ابزار (V)) بر خواص مکانیکی، متالورژیکی و شکل‌گیری عیوب در ناحیه جوش، مورد تحقیق قرار گرفت. در آزمایش‌های تجربی، پس از بازرسی چشمی، سیر تکاملی درشت ساختار و ریز ساختار عیوب ایجاد شده در ناحیه جوش و تحت تأثیر شرایط حاکم بر جوشکاری ارزیابی و

1 -Friction Stir Welding (FSW)

2 -The welding institute

3 -Backing Plate

4 -Shoulder

5 - Stir Zone (SZ)

6 - Thermo Mechanically Affected Zone (TMAZ)

7 - Heat Affected Zone (HAZ)

8- Aerospace industry

9- Effective Sheet Thickness (EST)

10. Hooking Defect

افزایش یافت. مشخصات ابزار مورد استفاده در شکل ۲ و جدول ۳ آورده شده است.

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر خواص مکانیکی و متالورژیکی از روش سطح پاسخ<sup>۱</sup> و الگوی آماری مکعب مرکزی<sup>۲</sup> جهت طراحی آزمایش استفاده گردید. همچنین پس از گیره بندی ورقها و تنظیم پارامترها سعی شد تا جوشکاری همه نمونهها تحت شرایط یکسانی انجام شوند؛ بدین ترتیب که سرعت ورود ابزار به قطعه کار ۲۰ میلی متر بر دقیقه، مدت زمان توقف ابزار قبل از حرکت و جوشکاری ۱۵ ثانیه و میزان نفوذ شانه ابزار ۰/۲ میلی متر بود. همچنین جهت دوران ابزار با توجه به راست گرد بودن رزوه ابزار، پاد ساعتگرد و جهت جوشکاری، عمود بر جهت نورد ورقها بود.

جهت انجام آزمایشهای متالوگرافی (بررسی درشت ساختار و ریز ساختار)، از کلیه نمونههای جوشکاری شده، نمونهای با ابعاد ۴×۱ سانتیمتر در راستای عمود بر خط جوش مطابق استاندارد AWS D 17.3 تهیه شد. جهت راحتی مطالعات میکروسکوپی، کلیه نمونهها مانع شده و سطح تمامی نمونهها با سمبادههای نرم تا مش ۲۰۰۰ صاف شد و سپس از پودر آلومینای ۰/۳ میکرون، جهت پولیش استفاده گردید. به منظور پدیدار شدن ناحیه جوش، از محلول اچ حاوی ۵۰ میلی لیتر محلول پولتن، ۲۵ میلی لیتر اسید نیتریک غلیظ و ۴۰ میلی لیتر از محلولی که حاوی ۳ گرم اسید کرمیک در ۱۰ میلی لیتر آب بود، استفاده گردید. لازم به ذکر است که محلول پولتن شامل ۱۲ میلی لیتر اسید کلریدریک، ۶ میلی لیتر اسید نیتریک، یک میلی لیتر اسید فلوئوریک، و یک میلی لیتر آب می باشد [۹].

## نتایج و بحث

### متالوگرافی

شکل ۳ تصویر درشت ساختار و ریز ساختار میکروسکوپ نوری عیب هوک را نشان می دهد. در این

بر اساس استاندارد AWS D17.3 [۸] مورد تحلیل و تأثیر تغییرات سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر درشت ساختار، ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لبه روی هم ورقهای با ضخامت متفاوت آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶، مورد بررسی قرار گرفت.

## مواد و روشها

### مواد اولیه مورد تحقیق

در این پژوهش، از دو ورق آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶ با ضخامت ورق پایه (A) و متصل شونده (B) به ترتیب ۵ و ۲/۵ میلی متر که در صنایع هوافضا کاربرد گسترده دارند، استفاده گردید. شایان ذکر است که اگرچه هر دو ورق از لحاظ آنالیز عنصری مشابه ولی از لحاظ تاریخچه عملیات حرارتی صورت گرفته متفاوت بودند. به گونه ای که ورق ۵ میلی متری کار سرد شده H ۳۲۱ و ورق ۲/۵ میلی متری آنیل بود. همچنین از آنجا که نوع عملیات حرارتی انجام گرفته بر روی دو ورق متفاوت بود، سختی هر دو ورق به صورت مجزا توسط دستگاه سختی سنج برینل با ساچمه کاربید تنگستنی و نیروی ۶۲/۵ کیلوگرم انجام و آزمون کشش با دستگاه کشش به ظرفیت ۲۰ تن، نرخ کرنش ۲ میلی متر بر دقیقه و دقت اندازه گیری ۰/۱ نیوتن طبق استاندارد DIN ۱۰۰۰۲ صورت پذیرفت. آنالیز ترکیب شیمیایی به روش کوانتومتری و خواص مکانیکی هر دو ورق، در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

### تجهیزات

به منظور انجام فرایند جوشکاری از دستگاه اتوماتیک جوشکاری اصطکاکی اختلاطی خطی در حالت نیمه اتومات استفاده گردید. همچنین با توجه به نوع فرایند، ابزاری از جنس فولاد گرم کار H ۱۳ استفاده گردید. ابزار مورد استفاده پس از طراحی و ماشین کاری جهت رسیدن خواصی مانند سختی بالا، مقاومت به سایش و افزایش استحکام ابزار، تحت عملیات حرارتی سخت سازی قرار گرفت و سختی ابزار به میزان ۵۰ HRC

1. Response surface Method (RSM)

2. Central Composite Design (CCD)

همانطور که مشاهده می‌شود در یک سرعت پیشروی و زاویه استقرار ثابت، با افزایش سرعت دورانی از ۲۵۰ به ۷۵۰ دور بر دقیقه در هر دو سمت پیش‌رونده و پس‌رونده، ارتفاع هوک<sup>۵</sup> افزایش می‌یابد. در حقیقت با افزایش سرعت دورانی، حرارت ورودی افزایش یافته و به دلیل وجود شیارهای روی پین مدور<sup>۶</sup>، سیلان عمودی<sup>۷</sup> مواد در فصل مشترک نیز به شدت افزایش می‌یابد و به همین دلیل فصل مشترک را تا ارتفاع بیشتری بالا می‌کشد و در نتیجه ارتفاع هوک افزایش می‌یابد.

در شکل ۵ نمودار تأثیر سرعت دورانی ابزار بر تغییرات ارتفاع هوک در دو سمت پیش‌رونده و پس‌رونده نشان داده شده است. همان‌گونه که ذکر شد و در شکل نیز مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت دورانی به دلیل افزایش حرارت و سیلان عمودی مواد ارتفاع هوک در هر دو سمت افزایش می‌یابد.

در شکل ۶ تأثیر سرعت پیشروی ابزار بر ارتفاع و شکل‌گیری عیب هوک نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سرعت دورانی و زاویه استقرار ثابت، با افزایش سرعت پیشروی از ۲۵ به ۷۵ میلی‌متر بر دقیقه، ارتفاع و جهت‌گیری هوک در هر دو سمت پیش‌رونده و پس‌رونده تغییر می‌کند. افزایش سرعت پیشروی، سبب کاهش ارتفاع هوک در هر دو سمت پیش‌رونده و پس‌رونده می‌شود؛ زیرا افزایش سرعت پیشروی، باعث کاهش حرارت ورودی و سیلان عمودی مواد شده و در نتیجه ارتفاع هوک کاهش می‌یابد.

در شکل ۷ نمودار تأثیر سرعت پیشروی ابزار بر تغییرات ارتفاع هوک در هر دو سمت پیش‌رونده و پس‌رونده نشان داده شده است. همان‌طور که در بالا ذکر شد و در شکل نیز قابل مشاهده می‌باشد، با افزایش سرعت پیشروی به دلیل کاهش حرارت ورودی ارتفاع هوک در هر دو سمت پیش‌رونده و پس‌رونده کاهش می‌یابد.

نمونه ارتفاع هوک در سمت پیش‌رونده<sup>۱</sup> ۱/۰۶۸ میلی‌متر و در سمت پس‌رونده<sup>۲</sup> ۱/۱۹۸ میلی‌متر مشاهده گردید. همچنین همان‌گونه که در شکل مشخص است به علت تفاوت در ضخامت ورق‌های آلومینیومی جوشکاری شده و تفاوت در حرارت ورودی، ناحیه جوش همواره نامتقارن و با توجه به تغییرات ریزساختاری همواره چهار ناحیه دکمه جوش<sup>۳</sup>، منطقه متأثر از حرارت، منطقه متأثر از عملیات ترمومکانیکال و منطقه فلز پایه<sup>۴</sup> مشاهده گردید.

در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی در حالت لبه روی‌هم، دو عامل ارتفاع هوک و جهت‌گیری فصل مشترک بر روی خواص مکانیکی ناحیه اتصال تأثیر می‌گذارند. در حقیقت ارتفاع عیب هوک، هم تراز با پارامتر ضخامت مؤثر ورق بوده و حداقل ضخامت ورق اندازه‌گیری شده از طریق اندازه‌گیری کوچک‌ترین فاصله بین فصل مشترک اتصال نیافته و بالای ورق بالایی یا پایین ورق پایینی ضخامت مؤثر ورق می‌باشد [۱۰ و ۱۱].

جهت حرکت فصل مشترک و هوک در هر دو سمت پیش‌رونده و پس‌رونده تابعی از طول پین [۱۲ و ۱۳] و یا تقابل راست‌گرد یا چپ‌گرد بودن شیارهای ابزار با جهت حرکت دورانی ابزار (ساعتگرد یا پاد ساعتگرد) می‌باشد. در این پژوهش از آنجا که منحرف شدن هوک به سمت بالا بسیار مفید بود، لذا با توجه به راست‌گرد بودن رزوه پین جهت دوران ابزار پاد ساعتگرد لحاظ گردید. در نتیجه سیلان عمودی مواد و هوک در هر دو سمت ناحیه جوش همواره به سمت بالا منحرف گردید. در صورتی که اگر با همین ابزار در حالت دوران ساعتگرد جوشکاری انجام می‌گرفت، سبب می‌شود که هوک در هر دو سمت به پایین متمایل شود.

شکل ۴ تأثیر سرعت دورانی ابزار بر ارتفاع و شکل‌گیری عیب هوک در ناحیه جوش نشان می‌دهد.

5. Hook Height

6. Pin

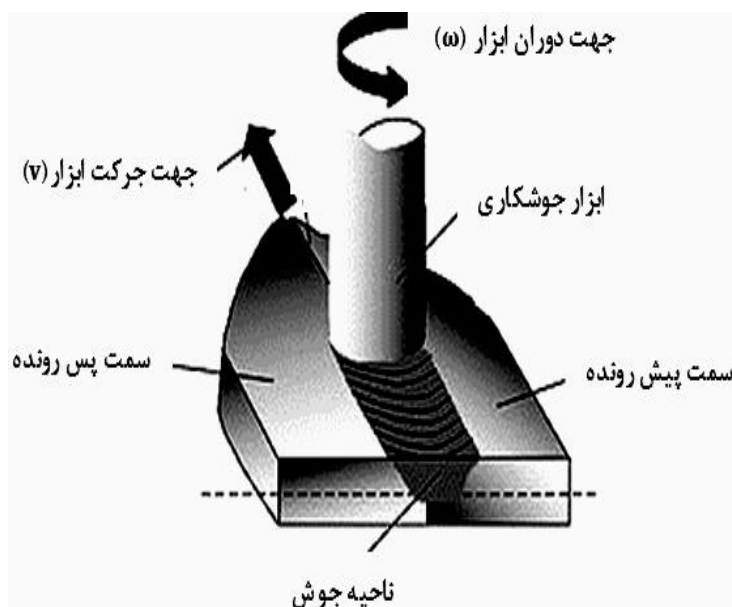
7. Vertical Flux

1. Advancing Side

2. Retreating Side

3. Nugget

4. Base Metal



شکل ۱- تصویر کلی از فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاقی

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ورق‌های مورد استفاده در این پژوهش

Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Cr (%)	Ni (%)	Zn (%)	Ti (%)	Pb (%)	نمونه
باقیمانده	۰/۰۸۴	۰/۲۰۸	۰/۰۱۴	۰/۶۳۰	۴/۹۱۱	۰/۱۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۲۱	۰/۰۳۰	۰/۰۰۱	ورق A (۵ میلی‌متر)
باقیمانده	۰/۱۱۴	۰/۱۸۶	۰/۰۲۵	۰/۵۷۸	۴/۸۱۳	۰/۰۱۵	۰/۰۰۷	۰/۰۴۳	۰/۰۴۲	۰/۰۰۶	ورق B (۲/۵ میلی‌متر)

جدول ۲- خواص مکانیکی ورق‌های مورد استفاده مطابق استاندارد DIN۱۰۰۰۲

استحکام نهایی (R <sub>m</sub> ) (MPa)	استحکام تسلیم (R <sub>0.2%</sub> ) (MPa)	درصد ازدیاد طول (EL) (%)	سختی (HB)	نمونه
۳۶۰	۲۵۵	۱۲	۹۰	ورق A (۵ میلی‌متر)
۳۲۵	۲۱۰	۱۶	۸۰	ورق B (۲/۵ میلی‌متر)



شکل ۲- ابزار مورد استفاده در پژوهش

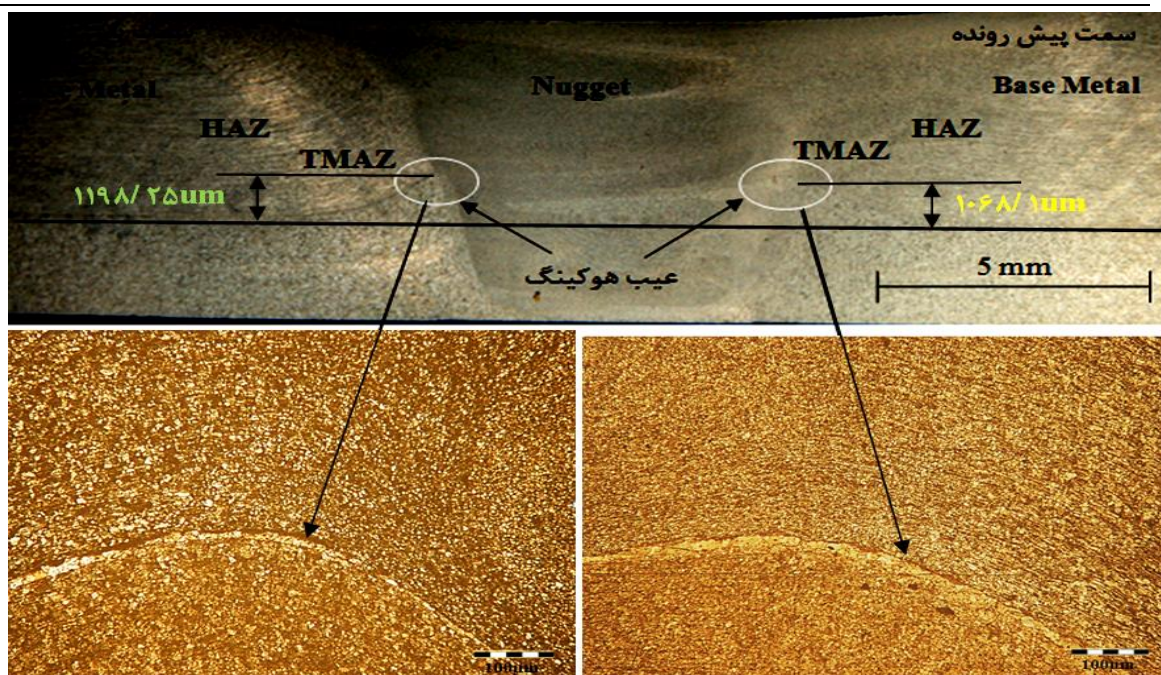
جدول ۳- ابعاد هندسی ابزار مورد استفاده در این پژوهش

عمق رزوه (میلی متر)	گام رزوه (میلی متر)	ارتفاع پین (میلی متر)	قطر بزرگ پین (میلی متر)	قطر کوچک پین (میلی متر)	قطر شانه (میلی متر)
۰/۳	۰/۸	۷	۷	۴	۲۰

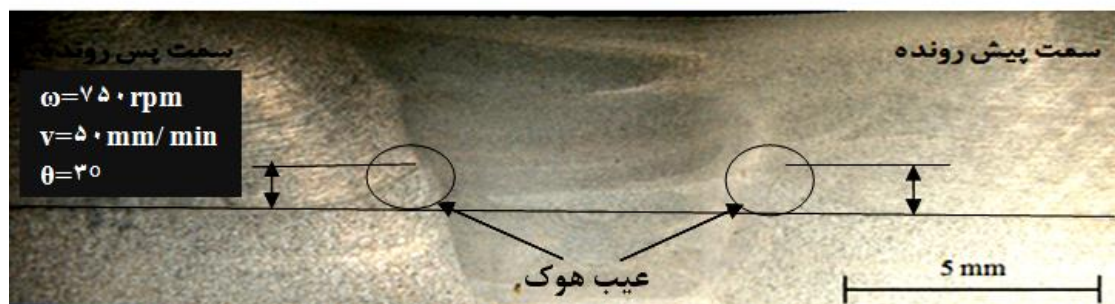
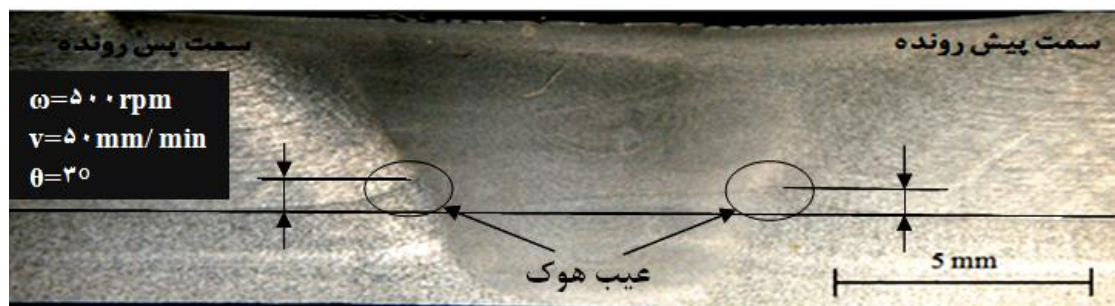
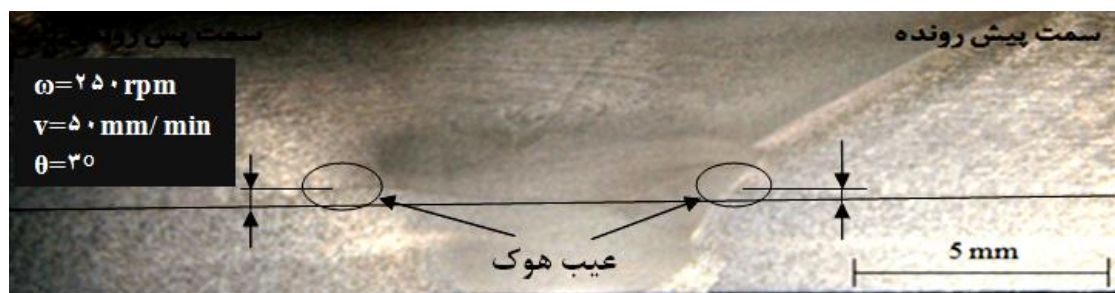
جدول ۴- مقادیر اعمال شده پارامترها جهت طراحی آزمون

حداکثر	حداقل	واحد	پارامترهای جوشکاری
۷۵۰	۲۵۰	rpm	سرعت دورانی ابزار
۷۵	۲۵	mm/min	سرعت پیشروی ابزار
۴	۲	degree	زاویه ابزار با قطعه کار



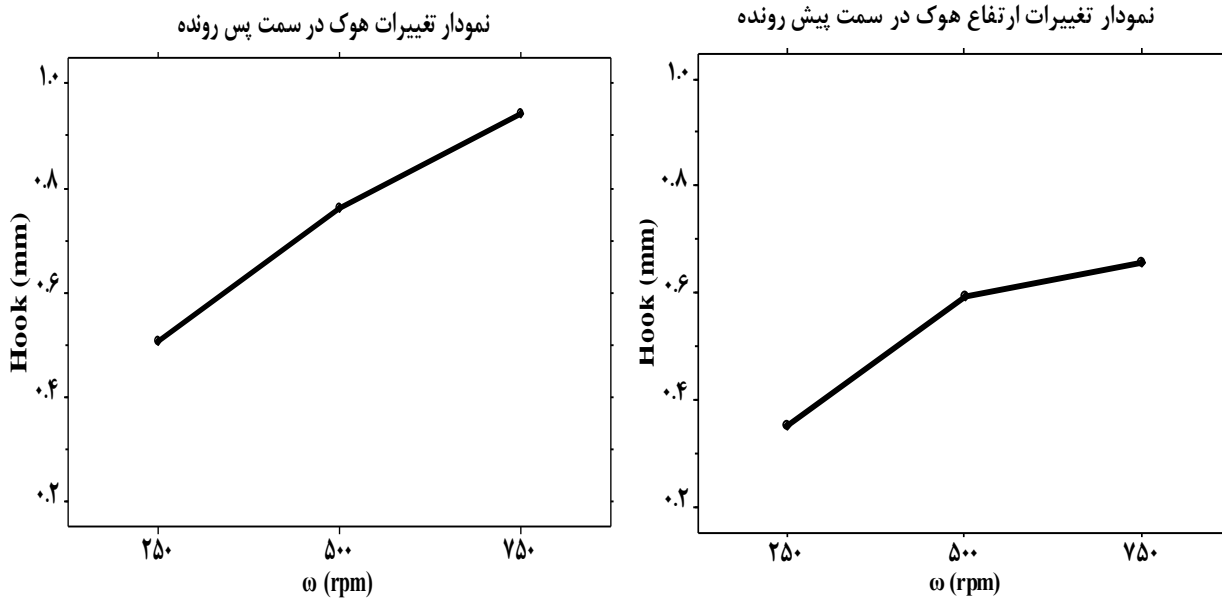


شکل ۳- درشت و ریز ساختار نوری عیب هوک در نمونه جوشکاری شده تحت پارامترهای  $\omega = 250 \text{ rpm}$ ,  $v = 50 \text{ mm/min}$ ,  $\theta = 30^\circ$  (ω=۷۵۰V=)

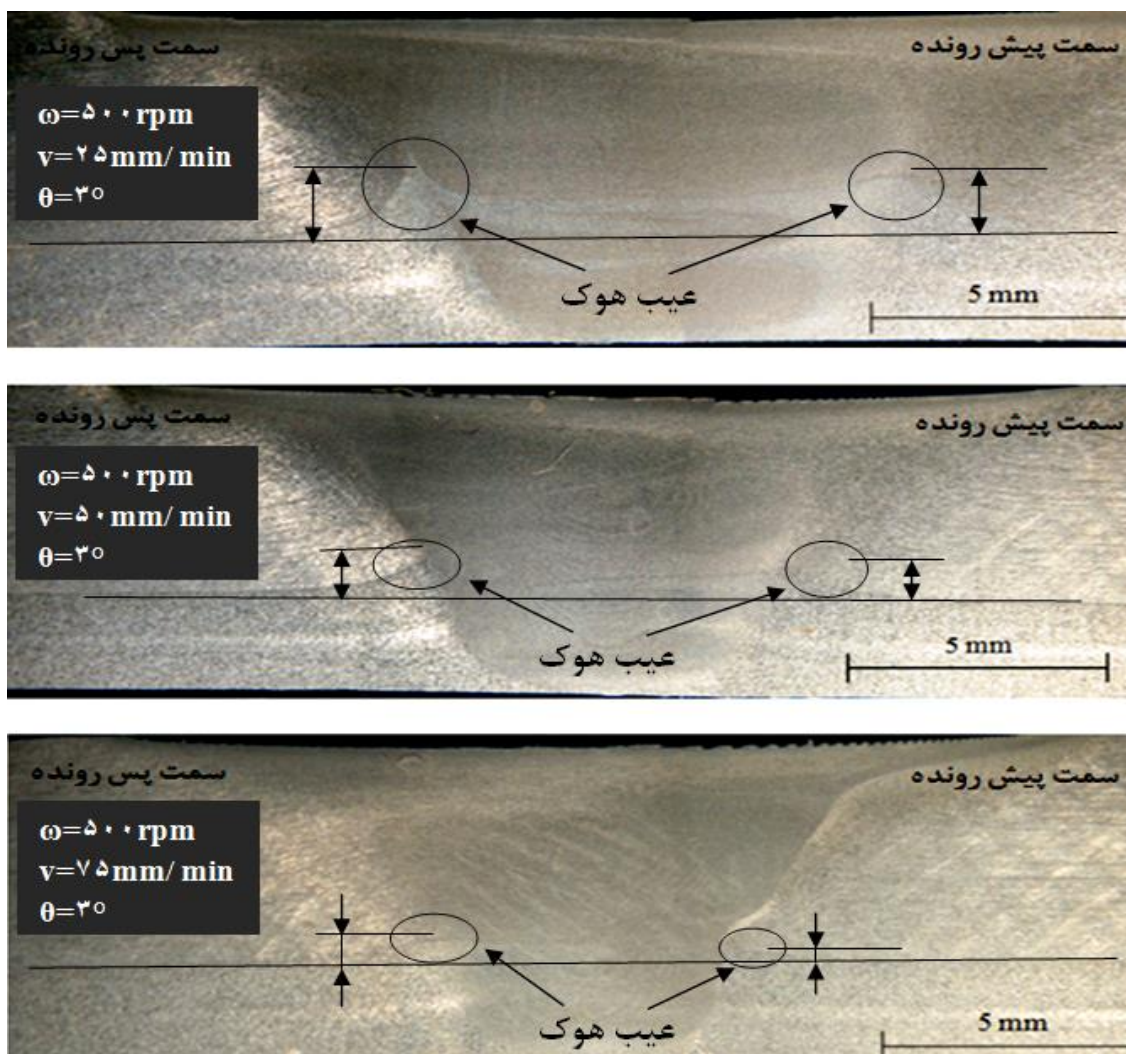


شکل ۴- تأثیر افزایش سرعت دورانی ابزار بر شکل گیری و ارتفاع عیب هوک



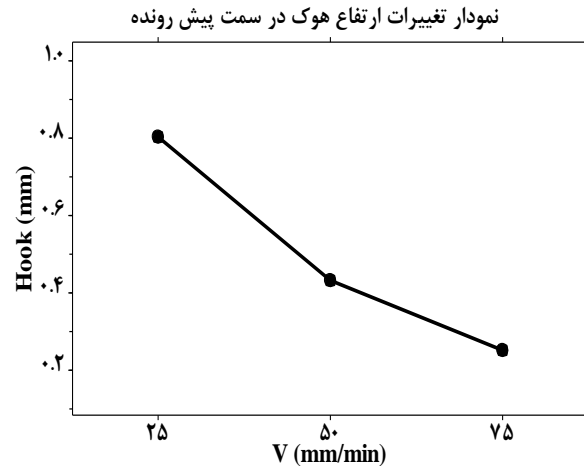
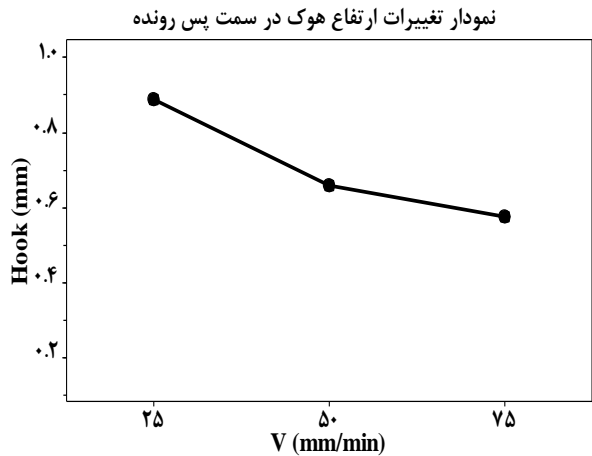


شکل ۵- نمودار تأثیر سرعت دورانی ابزار بر تغییرات ارتفاع هوک



شکل ۶- تأثیر افزایش سرعت پیشروی ابزار بر شکل گیری و ارتفاع هوک



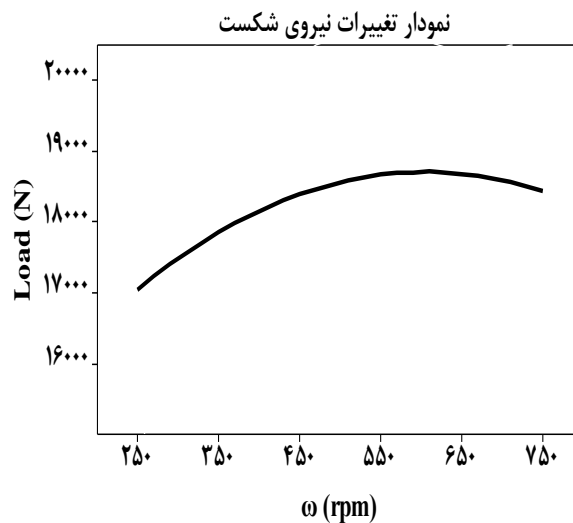


شکل ۷- نمودار تأثیر سرعت پیشروی ابزار بر تغییرات ارتفاع هوک

دور بر دقیقه مقداری کاهش می‌یابد؛ زیرا در سرعت پیشروی پایین (۲۵ میلی‌متر بر دقیقه) با افزایش سرعت دورانی به ۷۵۰ دور بر دقیقه، گرمای ورودی افزایش یافته و به طبع آن اختلاط نیز افزایش می‌یابد و موجب افزایش جریان عمودی مواد به سمت بالا می‌شود. افزایش بیش از حد سرعت دورانی سبب گردید که ارتفاع و شیب هوک افزایش یابد به گونه‌ای که در سرعت‌های دورانی خیلی زیاد در مقایسه با سرعت‌های کمتر، عیب هوک تیزتر شده و باعث کاهش ضخامت مؤثر ورق بالایی (۵ میلی‌متر) و در نتیجه، باعث کاهش نیروی شکست گردید و شکست از سمت پس‌رونده ورق ۵ میلی‌متر اتفاق افتاد.

### آزمون مکانیکی کشش

شکل ۸ نمودار تغییرات نیروی شکست در آزمون کشش، بر اساس تغییرات سرعت دورانی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش سرعت دورانی از ۲۵۰ به ۵۰۰ دور بر دقیقه، نیروی شکست افزایش می‌یابد و دلیل آن این است که در سرعت دورانی پایین (۲۵۰ دور بر دقیقه) و سرعت پیشروی بالا (۷۵ میلی‌متر بر دقیقه) یک اتصال با فصل مشترک ناقص ایجاد می‌گردد و سبب ایجاد عیب نقص پیوند تماسی شده و در نتیجه باعث کاهش مقاومت جوش می‌شود. همچنین همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، نیروی شکست با افزایش سرعت دورانی از ۵۰۰ به ۷۵۰



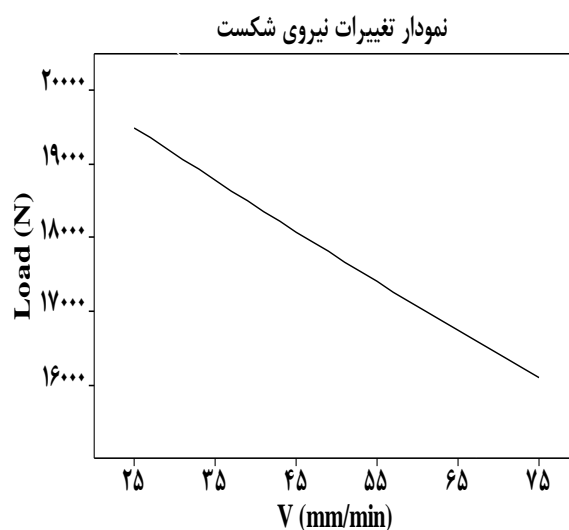
شکل ۸- نمودار رگرسیون تأثیر سرعت دورانی ابزار بر تغییرات نیروی شکست

نشان می‌دهد. مطابق این شکل، شکست در داخل دکمه جوش اتفاق افتاده است؛ به گونه‌ای که دو ورق به‌طور کامل در راستای فصل مشترک از هم جدا شده‌اند. دلیل این شکست وجود عیب نقص پیوند تماسی در صفحه فصل مشترک می‌باشد. عیب نقص پیوند تماسی، در حقیقت با کاهش سطح مقطع جوش، اثری مخرب بر روی خواص مکانیکی دارد. در واقع عیب نقص پیوند تماسی، باعث کاهش عرض ناگت و مقاومت شده و در نتیجه شکست از ناحیه فصل مشترک اتفاق افتاده است. 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 رفته‌اند و می‌توان گفت شکست ترد اتفاق افتاده است.

همچنین در آزمون کشش مشاهده گردید، تعدادی از نمونه‌ها دقیقاً در فصل مشترک بین جوش با فلز پایه و از ورق نازک‌تر (۲/۵ میلی‌متر) شکسته می‌شوند. که پس از بررسی و تحلیل مشخص گردید که این نمونه‌ها به علت ارتفاع هوک کم در سمت پیش‌رونده، از منطقه متأثر از ترمومکانیکال جایی که بیش‌ترین حرارت در آنجا ایجاد می‌شود و منطقه نسبتاً ضعیفی می‌باشد شکسته شده‌اند.

در شکل ۹ نمودار تغییرات نیروی شکست در آزمون کشش، بر اساس تغییرات سرعت پیشروی نشان داده شده است. مطابق این شکل با افزایش سرعت پیشروی نیروی شکست کاهش می‌یابد؛ زیرا با افزایش سرعت پیشروی، گرمای ورودی فرایند کم شده و لذا دمای ناحیه متأثر از ترمومکانیکال کاهش می‌یابد. از آنجا که عیب هوک نیز در این ناحیه تشکیل می‌شود، کاهش دمای ناحیه، سبب کاهش سیلان و کرنش پلاستیک مواد می‌گردد. در نتیجه ارتفاع هوک کاهش یافته و به سمت بالا کشیده شدن فصل مشترک کم‌تر دیده می‌شود. علاوه بر این، با توجه به شیارهای تعبیه شده بر روی پین، افزایش سرعت پیشروی سبب کاهش اختلاط عمودی مواد در دکمه جوش گردید و در نتیجه ارتفاع عیب هوک به شدت کاهش یافت. کاهش بیش از اندازه ارتفاع عیب هوک، سبب شد شکست از ناحیه جوش ورق ۲/۵ میلی‌متر اتفاق بیفتد. همچنین به علت کاهش هوک در دو سمت و به دلیل وجود عیب نقص پیوند تماسی، در هنگام آزمون کشش، دو ورق بعد از تحمل نیروی به نسبت زیاد، به‌طور کامل از روی هم کنده شدند و شکست فصل مشترکی اتفاق افتاد.

شکل ۱۰ تصویر محل شکست و همچنین شکست نگاری نمونه‌ای که از فصل مشترک شکسته شده است را



شکل ۹- نمودار رگرسیون تأثیر سرعت پیشروی ابزار بر تغییرات نیروی شکست

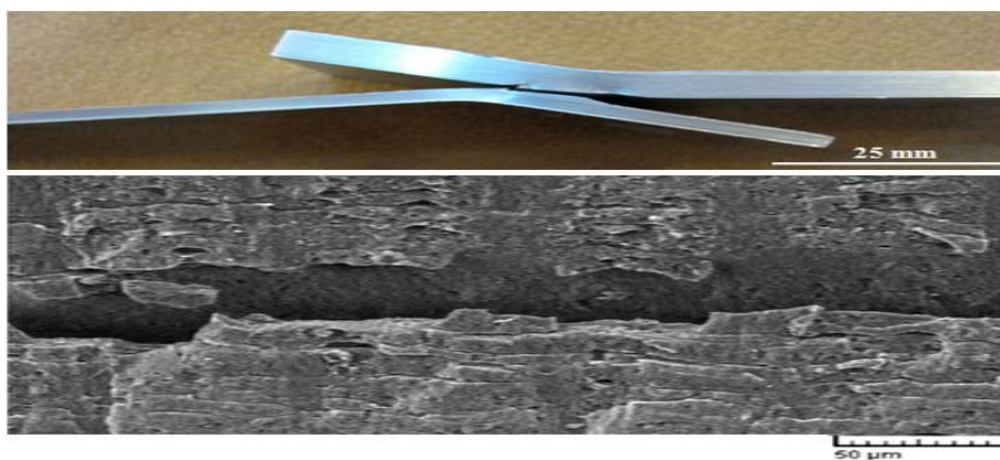
وجود عیب هوک (که در تصاویر محل شکست نیز کاملاً مشهود است)، نوعی نیروی خمشی بر سطح قطعه وارد شود که سبب گردد، در مراحل نهایی شکست، بالای سطح اتصال دچار پارگی شود.

در شکل ۱۳ تصویر محل شکست و همچنین تصویر گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌ای که از فلز پایه ورق ۲/۵ میلی‌متر آنیل، دچار شکست شده نشان داده شده است. این نمونه علاوه بر اینکه دارای ارتفاع هوک مناسب بود، ضخامت مؤثر ورق بالایی نیز در این نمونه کافی و مناسب جهت تحمل نیروی کششی بود، همچنین شیب ملایم عیب هوک نیز سبب گردید که در این نمونه، شکست از ناحیه جوش اتفاق نیفتد و از آنجا که استحکام ورق آنیل و نازک ۲/۵ میلی‌متری، کم‌تر از ورق ۵ میلی‌متری کار سرد شده بود؛ لذا نمونه از فلز پایه ورق ۲/۵ میلی‌متری آنیل دچار شکست شد. در تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، ریز حفرات هم‌محور قابل مشاهده هستند. شاید بتوان شکست این نمونه را نوعی شکست مختلط در نظر گرفت، به گونه‌ای که هم شکست نرم و هم شکست ترد در نمونه اتفاق افتاده است.

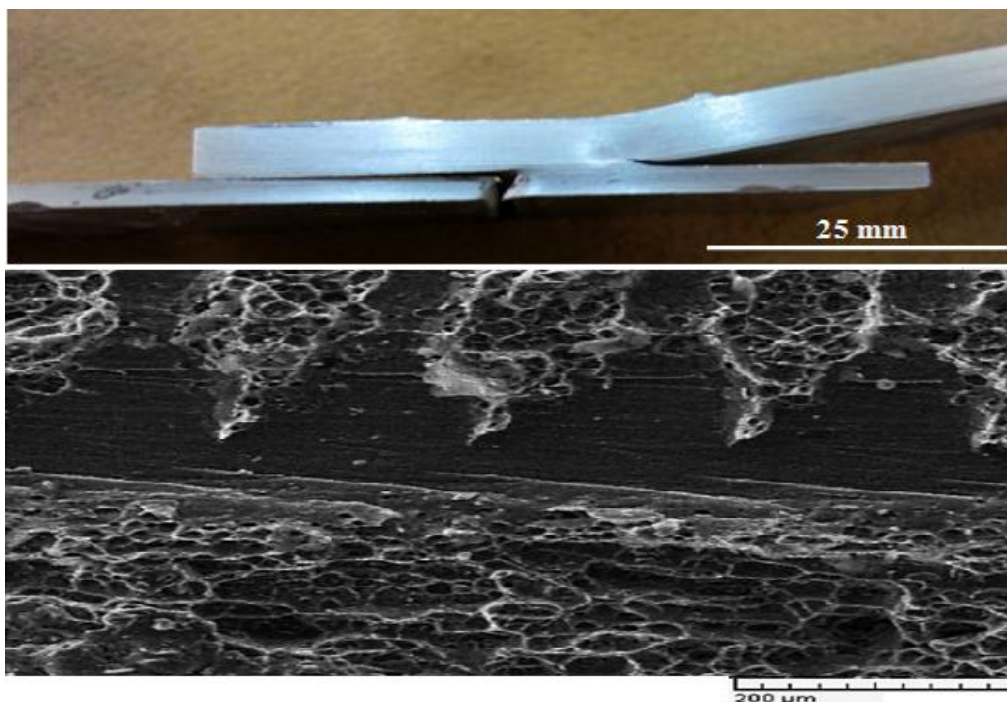
شکل ۱۱ تصویر محل شکست و تصویر شکست نگاری نمونه‌ای که از منطقه متأثر از کار مکانیکی و حرارت، ورق ۲/۵ میلی‌متر شکسته شده، نشان داده شده است. این نمونه به دلیل وجود عیب تونلی بسیار ریز در امتداد فصل مشترک، در منطقه متأثر از کار مکانیکی و حرارت، جایی که بیش‌ترین حرارت در آنجا ایجاد می‌شود و منطقه نسبتاً ضعیفی است شکسته شده است. ریز حفرات مشاهده شده در تصاویر مربوط به شکست نگاری این نمونه، محل برخورد شیارهای تعبیه شده روی پین با داخل عیب تونلی است و در قسمت پایین تصویر وجود ریز حفراتی با قطر نسبتاً بزرگ و هم‌محور مشهود می‌باشد.

در شکل ۱۲ تصویر محل شکست و همچنین تصویر گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌ای که از هوک سمت پس‌رونده ورق ۵ میلی‌متر شکسته شده، نشان داده شده است. این نمونه به دلیل ارتفاع هوک بسیار زیاد (به علت حرارت و سیلان عمودی زیاد) و کاهش شدید ضخامت مؤثر ورق ۵ میلی‌متر، از سمت پس‌رونده ورق ۵ میلی‌متر در نیروی نسبتاً کم دچار شکست شده است. این عیب بیش‌تر در نمونه‌های با سرعت دورانی بالا و همچنین سرعت پیشروی پایین (گام جوشکاری بالا) مشاهده گردید. در تصویر شکست نگاری با میکروسکوپ الکترونی، وجود ریز حفرات با ابعاد متفاوت را در سطح مقطع جوش مشاهده گردید. این شکست، به نظر نوعی شکست پارگی می‌باشد. و ممکن است در هنگام آزمون کشش، به علت چرخش نمونه‌ها به

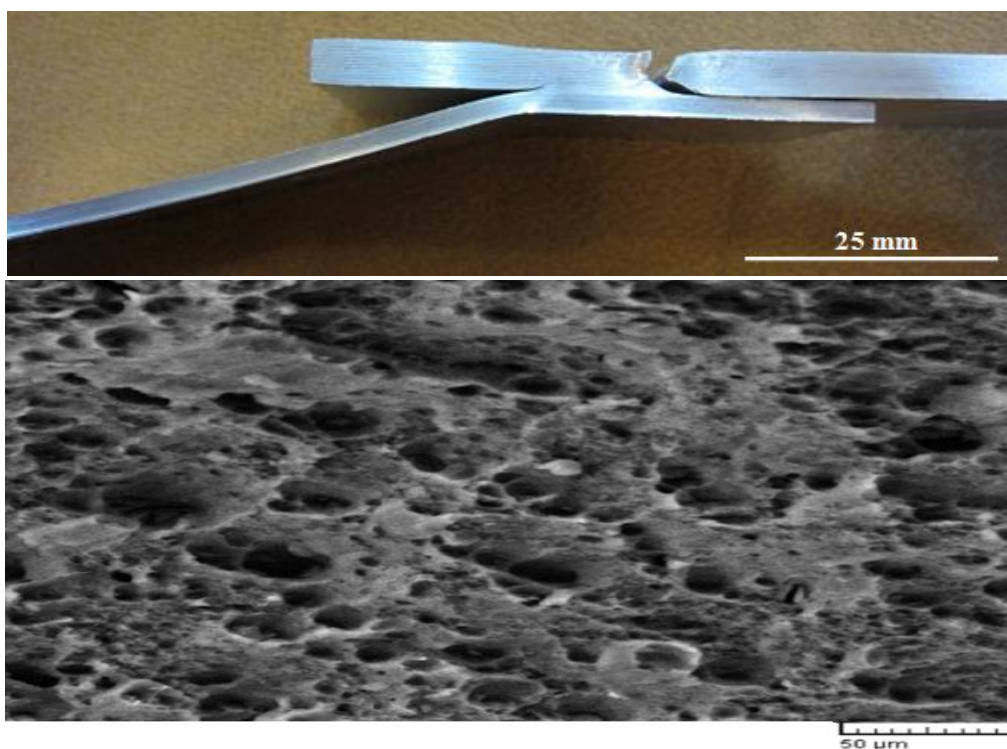
دلیل



شکل ۱۰- شکست نگاری محل شکست نمونه دارای عیب نقص پیوند تماسی تحت پارامترهای  $\theta = 3^\circ$  ,  
( $\omega = 500 \text{ rpm}$ ,  $V = 50 \text{ mm/min}$ )

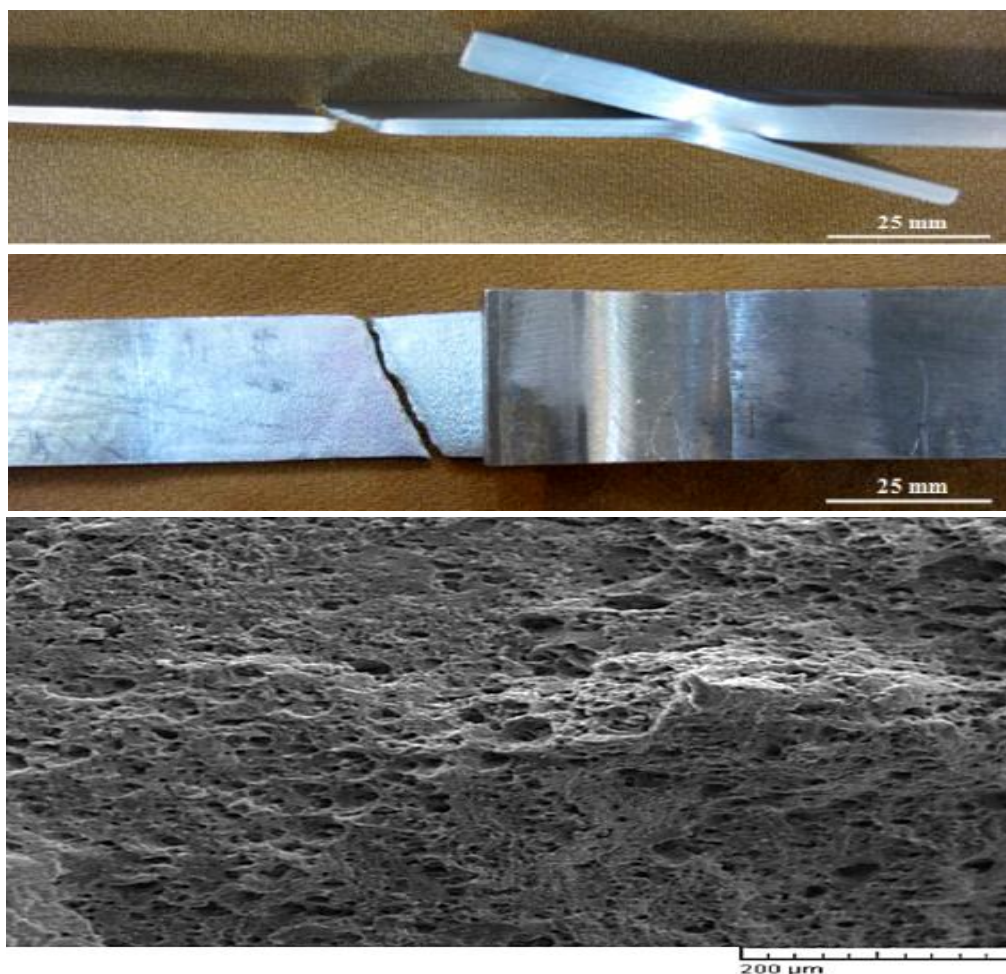


شکل ۱۱- شکست نگاری محل شکست در نمونه دارای عیب تونلی و تحت پارامترهای ( $\theta = 2^\circ$ ,  $V = 25 \text{ mm/min}$ ,  $\omega = 250$ )



شکل ۱۲- شکست نگاری محل شکست در نمونه با ارتفاع هوک زیاد و تحت پارامترهای ( $\theta = 4^\circ$ ,  $V = 25 \text{ mm/min}$ ,  $\omega = 750$ )





شکل ۱۳- شکست نگاری محل شکست در نمونه با ارتفاع هوک مناسب و تحت پارامترهای ( $\theta = 4^\circ$ ,  $25 \text{ mm/min}$ ,  $\omega = 250 \text{ V}$ ) rpm

### نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر پارامترهای سرعت دورانی و سرعت پیشروی فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی بر روی ورق‌های آلومینیومی با ضخامت متفاوت مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت. بر خلاف نتایج سایر محققان، به دلیل تفاوت ضخامت ورق‌های جوشکاری شده در اتصال لبه روی هم از عیب هوک جهت نیل به خواص مکانیکی بهینه، استفاده گردید که نتایج به صورت خلاصه در زیر آمده است:

۱- افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت پیشروی (افزایش گام جوشکاری)، سبب افزایش حرارت ورودی، افزایش سیلان عمودی و در نتیجه

افزایش ارتفاع هوک و کاهش ضخامت مؤثر ورق شده، و باعث می‌شود، شکست از منطقه ترمومکانیکال، جایی که بیش‌ترین حرارت ورودی به آنجا وارد می‌شود اتفاق بیفتد.

۲- با افزایش سرعت پیشروی میزان اختلاط مواد کاهش یافته و عملیات ترمومکانیکی کمتری بر روی فلز پایه صورت می‌پذیرد و فلز پایه کرنش کمتری را تحمل می‌کند و در نتیجه در ناحیه اتصال عیب نقص پیوند تماسی شکل گرفته و موجب شکست فصل مشترکی می‌شود.

۳- وجود عیب هوک در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی ورق‌های با ضخامت متفاوت در

می‌توان ضخامت مؤثر ورق را از طریق کم کردن ارتفاع عیب هوک از ضخامت کل ورق بالایی (۵ میلی‌متر) به دست آورد.

۶- هرگاه ارتفاع عیب هوک به اندازه‌ای باشد که در دکمه جوش، ضخامت مؤثر ورق از هر دو سمت یکسان باشد، می‌توان پیش‌بینی کرد که در صورت عدم وجود عیوب دیگر (نقص پیوند تماسی و تونلی) محل شکست در آزمون کشش از دکمه جوش نخواهد بود.

### تقدیر و تشکر

از زحمات و همکاری کارکنان محترم کارگاه جوش و آزمایشگاه مهندسی مواد صنایع صنم به‌خصوص جناب آقایان مهندسین رنجبرکی، رضایی، دهقانی، قاسمی، تپهپیری و علیزاده که در انجام آزمایش‌ها پشتیبان اینجانب بودند، سپاسگزاری می‌نمایم.

### References:

- [1] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, C.J. Dawes, Patent Application, No. 9125978.8, 1991.
- [2] H. Lombard, D.G. Hattingh, A. Steuwer, M.N. James, Optimising FSW process parameters to minimize defects and maximize fatigue life in 5083-H321 aluminium alloy, *Engineering Fracture Mechanics* 75 ,pp. 341-354, 2008.
- [3] R.S. Mishraa, Z.Y. Mab, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering*, Vol. 50, pp. 1-78, 2005.
- [4] Mats Ericsson, Lai-Zhe Jin, Rolf Sandstrom, Fatigue properties of friction stir overlap welds, *International Journal of Fatigue*, pp. 57-69, 2007.
- [5] D. Fersini, A.Pirondi, Fatigue behavior of Al2024-T3 friction stir welded lap joints, *Engineering Fracture Mechanics*, 2006.

طرح اتصال لبه روی هم به‌عنوان یک فاکتور مردود کننده اتصال جوشی شناخته نمی‌شود و در واقع ارتفاع و جهت‌گیری آن می‌باشد که بر روی نتایج آزمون کشش برش تأثیر گذاشته و تعیین کننده کیفیت اتصال می‌باشد.

۴- به علت متفاوت بودن ضخامت ورق‌ها، وجود عیب هوک در هر دو سمت و ارتفاع و جهت‌گیری مناسب آن در طرح اتصال لبه روی هم مفید بوده و هرگاه ارتفاع عیب هوک به اندازه‌ای باشد که در دکمه جوش، ضخامت مؤثر ورق از هر دو سمت یکسان باشد، در صورت عدم وجود عیوب دیگر (نقص پیوند تماسی و تونلی) محل شکست در آزمون کشش از دکمه جوش نخواهد بود.

۵- ارتفاع عیب هوک، هم‌تراز با پارامتر ضخامت مؤثر ورق است. از آنجا که در این پژوهش سیلان عمودی مواد در دکمه جوش به سمت بالا می‌باشد،

- [6] L. Dubourg, A. Merati, M. Jahazi, Process optimization and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin, *Materials and Design*, pp. 3324-3330, 2010.
- [7] X. Cao, M. Jahazi, Effect of tool rotational speed and probe length on lap joint quality of a friction stir welded magnesium alloy, *Materials and Design*, pp. 32, 1-11, 2011.
- [8] American Welding Society Committee D17.3, Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Hardware, American Welding Society (AWS), Miami, Edition.1, No. 17.3, 2010.
- [9] M. Kathleen, et. al., *Metals Handbook: Metallography and Microstructure*, American Society for Metals (ASM), Vol.9, Ninth edition, pp. 352-354, 1985.

[10] M. Ericsson, L.Z. Jin, R. Sandstrom, Fatigue properties of friction stir overlap welds, International Journal of Fatigue, pp. 57-69, 2007.

[11] G. Buffa, G. Campanile, L. Fratini, Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties, Materials Science and Engineering a 519, pp. 19-26, 2009.

[12] H.B. Chen, K. Yan, T. Lin, S.B. Chen, C.Y. Jiang, The investigation of typical welding defects for 5456

aluminum alloy friction stir welds, Materials Science and Engineering A, pp.64-69, 2006.

[13] Y.C. Chen, K. Nakata, Friction stir lap joining aluminum and magnesium alloys, Scripta Materialia 68, pp. 433-436, 2008.

[۱۴] م. عزیزیه، ع. صادقی، ا.ح. کویچی، " بررسی ریزساختار و ویژگی‌های مکانیک اتصال اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم ۱۱۰۰ به ZA31"، مجله مواد نوین، دوره ۲، شماره ۶، ص. ۱ تا ۱۲، زمستان ۱۳۹۰.

