



# مقایسه ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال آلیاژ آلومینیم به روش اصطکاکی اغتشاشی در هوا و زیر آب

سلمان نوروزی<sup>۱\*</sup>، محسن شاکری<sup>۲</sup>، نامدار کریمی<sup>۳</sup>

۱- استادیار مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، بابل  
۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، بابل  
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی بابل، بابل  
\* صندوق پستی ۴۸۴، s-nourouzi@nit.ac.ir

**چکیده-** جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به عنوان یک فرایند اتصال در حالت جامد به طور گسترده در جوشکاری آلیاژهای مختلف فلزی به ویژه آلیاژهای آلومینیم بکار می‌رود. اگرچه حرارت کم تولید شده در طول این فرایند باعث ذوب فلز پایه نمی‌شود ولی سیکل حرارتی اعمالی روی نمونه، سبب کاهش خواص مکانیکی ناحیه اتصال می‌شود. اخیراً در این روش از جوشکاری، از روش‌های خنک‌کاری در حین فرایند استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر ریزساختار و خواص مکانیکی ناحیه جوش آلیاژ آلومینیم ۵۰۵۰ در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی زیر آب مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج آن با نمونه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در هوا مقایسه شد. نتایج حاصل نشان داد که ساختار جوشکاری شده در زیر آب به مقدار ۳۶٪ نسبت به ساختار جوشکاری شده در هوا ریزدانه‌تر بوده و استحکام کششی آن حدود ۶٪ ارتقا یافت. همچنین ناحیه اغتشاشی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی زیر آب دارای سختی بیشتری نسبت به جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در هوا است.  
**کلیدواژگان:** جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، جوشکاری زیر آب، خواص مکانیکی جوش، جوشکاری آلیاژ آلومینیم.

## Comparison of microstructure and mechanical properties of aluminum alloy joining by friction stir welding in air and underwater

S. Nourouzi<sup>1\*</sup>, M. Shakeri<sup>2</sup>, N. Karimi<sup>3</sup>

1- Assis. Prof., Materials Eng., Mech. Eng. Faculty, Babol Univ. of Tech., Babol, Iran  
2- Assoc. Prof., Mech. Eng., Mech. Eng. Faculty, Babol Univ. of Tech., Babol, Iran  
3- MSc. Student, Mech. Eng., Babol Univ. of Tech., Babol, Iran  
\* P. O. B. 484, Babol, Iran. s-nourouzi@nit.ac.ir

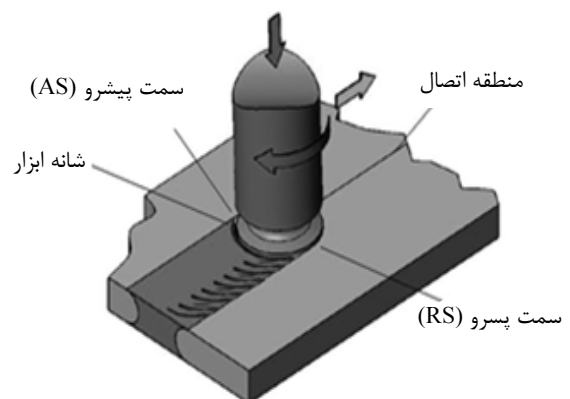
**Abstract-** Friction stir welding as a joining process in solid state welding various alloys widely used metal, particularly aluminum alloys. Although the low heat generated during the process does not melt the base metal, but the thermal cycle applied to the sample, which reduces the mechanical properties of the junction. Recently, this method of welding process is used in the cooling methods. In this study the microstructure and mechanical properties of 5050 aluminum alloy weld in two conditions: with friction stir welding in the air and on underwater friction stir welding was studied. The results of underwater friction stir welding were compared with samples of friction stir welding in the air. Results showed that the structure of the underwater welding was 36% more finely than welded structures in air and its tensile strength was improved about 6%. Also, the SZ zone in underwater friction stir welding has a higher hardness than friction stir welding in air.

**Keywords:** Friction Stir Welding, Underwater Welding, Mechanical Properties of The Weld, Welding of Aluminum Alloys.

## ۱- مقدمه

امروزه آلیاژهای آلومینیم به علت نسبت استحکام به وزن و مقاومت به خوردگی بالا نسبت به فولادها، به طور وسیعی در صنایع هوافضا، حمل و نقل و شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با گسترش استفاده از آلومینیم در صنایع مختلف، موضوع اتصالات در آلیاژهای آلومینیم بیش از پیش مورد توجه قرار گرفت. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی<sup>۱</sup> از فرایندهای جوشکاری حالت جامد است که به طور موفقیت‌آمیزی در اتصال آلیاژهای فلزی به ویژه آلیاژهای آلومینیم مورد استفاده قرار گرفت. در این روش، عملیات جوشکاری توسط ابزاری متشکل از دو بخش پین و شانه صورت می‌گیرد. ابزار با سرعت دورانی مناسب وارد فصل مشترک بین دو قطعه شده و با ایجاد حرارت ناشی از اصطکاک بین ابزار و قطعات، تغییر شکل مواد را به دنبال دارد که با پیشروی آن، اتصال دو نمونه به یکدیگر صورت می‌گیرد [۲،۱]. در شکل ۱ طرح‌واره فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نشان داده شده است.

در طول فرایند FSW اگرچه حرارت کم ایجاد شده منجر به ذوب فلز پایه نمی‌شود، ولی سیکل حرارتی اعمال شده روی نمونه‌ها سبب کاهش خواص مکانیکی ناحیه اتصال می‌شود [۴،۳]. استحکام اتصال های FSW می‌تواند با کنترل دما در حین جوشکاری بهبود یابد. یکی از این روش‌ها، استفاده از سیستم خنک‌کاری در حین فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌باشد.



شکل ۱ طرح‌واره فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی زیرآب<sup>۲</sup> یکی از زیر شاخه‌های FSW است که برای ارتقا و بهبود کیفیت جوش‌ها از طریق کنترل حرارت ورودی به ناحیه جوش و پایین نگه داشتن دمای ابزار در حین فرایند انجام می‌شود. به‌طور کلی روش UFSW به دو صورت انجام می‌شود. در روش اول کل مجموعه ابزار و قطعه در زیر آب قرار دارند و در روش دوم آب با دبی معین روی سطح قطعه کار جریان دارد [۵].

خنک‌کاری با مایع خارجی در چندین فرایند اتصال در حالت جامد جهت بهبود عملکرد اتصال بکار برده شد. سروکادا و همکاران [۶] جوشکاری اصطکاکی زیرآب آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ از طریق فشردن یک نمونه استوانه‌ای دوار با سرعت بالا بر روی یکدیگر را مطالعه کردند. این محققان اعلام کردند که استحکام خستگی اتصال در این حالت بیشتر از مقدار آن در حالت جوشکاری در هوا بوده است. فاراتینی و همکاران [۷] گزارش کردند که با استفاده از جریان آب روی ورق‌ها در طول FSW، بهبود قابل توجهی در استحکام کششی نهایی به وسیله کنترل حرارت ورودی توسط پارامترهای جوشکاری مختلف مشاهده شد. آنان اعلام کردند که تغییر ریزساختار نواحی جوش به وسیله خنک‌کاری آب، عامل بهبود در خواص مکانیکی بود. مفید و همکاران [۸] تاثیر خنک‌کنندگی آب را بر خواص اتصال آلیاژ آلومینیم به منیزیم در جوشکاری اصطکاکی مورد مطالعه قرار دادند. این محققان گزارش کردند که در جوشکاری اصطکاکی زیر آب به دلیل دمای پایین و حرارت ورودی کمتر، ترکیبات بین فلزی کمتری نسبت به جوشکاری در هوا در ناحیه اغتشاش ایجاد می‌شود.

در تحقیق حاضر، عملیات جوشکاری ورق‌های آلومینیم ۵۰۵۰ نورد سرد شده به روش اصطکاکی اغتشاشی در زیرآب و در هوا انجام شد. سپس ریزساختار و خواص مکانیکی ناحیه جوش نمونه‌های جوشکاری شده در این دو روش مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

## ۲- روش تحقیق

## ۲-۱- فلز پایه

در این پژوهش عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روی ورق‌های نورد سرد شده آلومینیم ۵۰۵۰ به ضخامت ۳ میلی‌متر

## 1. Friction Stir Welding (FSW)

## 2. Underwater Friction Stir Welding (UFSW)

صورت گرفت و برای بررسی دقیق تر و بزرگنمایی های بالاتر از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد.

### ۲-۳- آزمون کشش

نمونه های آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8 [۹] توسط دستگاه وایرکات برش خورده و آماده سازی شدند. برای این آزمون از یک دستگاه آزمایش کشش با ظرفیت ده تن استفاده شد. سرعت حرکت فکهای دستگاه ۲mm/min تنظیم شد. شکل ۴ نقشه ابعادی نمونه های کشش را نشان می دهد.



شکل ۲ تصویر فرایند FSW در زیر آب مورد استفاده در تحقیق



شکل ۳ ابزار HSS حاوی پین مخروطی مورد استفاده در تحقیق

در دو حالت در هوا و در زیر آب انجام شد. در شکل ۲ فرایند FSW انجام شده در زیر آب نشان داده شده است. ترکیب شیمیایی ورق آلیاژ آلومینیم مورد استفاده در جدول ۱ آمده است. ورقها با استفاده از دستگاه گیوتین به ابعاد ۳×۱۰×۱۵ میلی متر به گونه ای که جهت نورد در عرض ورق واقع شود برش زده شدند. نمونه ها بعد از برش لبه آنها ماشین کاری شده و سپس به وسیله سوهان تمیز شدند و در ادامه دو ورق به صورت لب به لب در داخل قیدی محکم ثابت شدند. فرایند جوشکاری در جهت طولی نمونه ها (عمود بر جهت نورد) با استفاده از یک ماشین فرز سه محور در سرعت های دورانی و پیشروی مختلف انجام شد.

در این تحقیق ابزاری از جنس فولاد ابزار HSS با پین مخروطی شکل استفاده شد. در جدول ۲ ترکیب شیمیایی فولاد ابزار HSS مورد استفاده، درج شده است. این ابزار دارای طول پین ۲/۷ میلی متر و قطر شانه ۲۰ میلی متر بود. همچنین شانه ابزار یک زاویه ۶ درجه به سمت داخل داشت تا مواد به واسطه چرخش پین وارد محفظه حاصل از این زاویه شده و در هنگام عبور ابزار با نیروی زیاد به سمت پایین فورج شوند. شکل ۳ هندسه ابزار HSS حاوی پین مخروطی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد.

### ۲-۲- متالوگرافی و مطالعه ریزساختاری

بعد از انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ورقها در جهت عمود بر راستای فرایند بریده شدند. نمونه های تهیه شده پس از سنباده کاری برای دستیابی به صافی سطح بالا توسط خمیر الماسه ۱۵ و ۳ میکرون صیقل کاری شدند. برای بررسی ریزساختاری و تعیین اندازه دانه، نمونه ها در محلول پولتون اصلاح شده به مدت ۴۵ ثانیه حکاکی شدند. مطالعه ریزساختاری نمونه های تهیه شده در بزرگنمایی های مختلف با استفاده از میکروسکوپ نوری مجهز به نرم افزار تحلیل تصاویر

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۵۰۵۰ مورد استفاده

| عنصر | Al   | Ti    | V     | Cr    | Ni     | Zn     | Cu    | Mn    | Si    | Mg    |
|------|------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| درصد | بقیه | ۰/۰۱۸ | ۰/۰۱۰ | ۰/۰۱۰ | <۰/۰۰۵ | <۰/۰۰۸ | ۰/۰۴۳ | ۰/۲۲۴ | ۰/۱۲۰ | ۱/۷۲۰ |

جدول ۲ ترکیب شیمیایی فولاد ابزار HSS

| عنصر | Fe    | Cu   | S    | P    | V    | W    | Co   | Ni   | Mo   | Cr   | Mn   | Si   | C    |
|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| درصد | ۷۵/۵۰ | ۰/۱۱ | ۰/۰۳ | ۰/۰۷ | ۱/۹۰ | ۷/۳۲ | ۴/۳۳ | ۰/۱۶ | ۵/۲۷ | ۳/۵۷ | ۰/۲۵ | ۰/۳۲ | ۰/۸۸ |

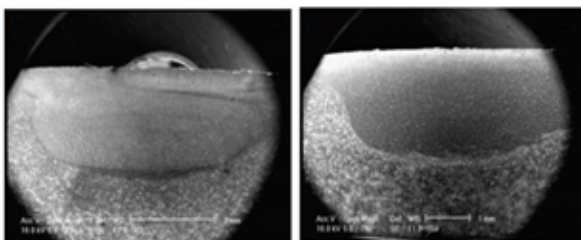
مشاهده نمی‌شود. این موضوع حاکی از اتصال سالم و عاری از عیب در شرایط اعمالی جوشکاری این دو روش می‌باشد.

### ۳-۲- ریزساختار

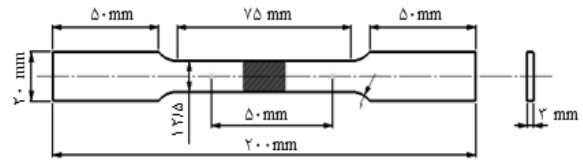
از آنجا که بررسی نتایج حاصل از آزمون کشش، ریزسختی نمونه‌های جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی بدون در نظر گرفتن تحولات ریزساختاری به وجود آمده میسر نمی‌باشد، لذا در ابتدا به بررسی تأثیر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر ریزساختار اتصال آلومینیم ۵۰۵۰ پرداخته شد. شکل ۷ ریزساختار نمونه جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی زیرآب را نشان می‌دهد. در این شکل، سه ناحیه<sup>۱</sup> (۱) ناحیه اغتشاشی (SZ)، (۲) متأثر ترمومکانیکی<sup>۲</sup> و (۳) متأثر از حرارت<sup>۳</sup> دیده می‌شود. در ناحیه اغتشاشی اندازه دانه در مقایسه با فلز پایه به شدت ریز و همگن شده‌اند. این پدیده ناشی از اثر تبلور مجدد است که به دنبال تغییر شکل پلاستیکی شدید در این منطقه رخ داده است. دانه‌ها در ناحیه TMAZ مشابه فرایندهای شکل‌دهی سرد، دارای جهت‌گیری خاصی هستند که در مرز بین ناحیه اغتشاشی و ناحیه HAZ به شکل طولی کشیده شده‌اند.



شکل ۵ تصویر سطح نمونه‌های جوشکاری شده به روش الف-FSW، ب-UFSW



شکل ۶ تصویر درشت ساختار نمونه‌های جوشکاری شده به روش



شکل ۴ ابعاد نمونه کشش مطابق با استاندارد ASTM-E8

### ۲-۴- آزمون سختی سنجی

ریزسختی ویکرز روی سطح مقطع نمونه‌ها (عمود بر مسیر جوشکاری) و عمق ۱/۵ میلی‌متری زیر سطح انجام شد و میزان بار دستگاه ۱۰۰ گرم و مدت زمان اعمال بار ۱۵ ثانیه تنظیم شد. فواصل انجام آزمون روی هر نمونه ۱/۵ میلی‌متر انتخاب گردید.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- کیفیت ظاهری

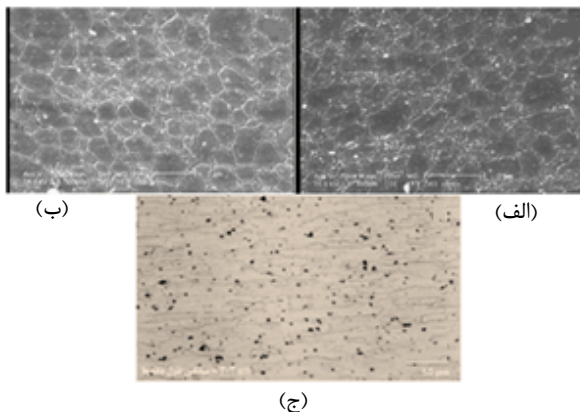
ابتدایی‌ترین روش ارزیابی نمونه جوشکاری شده بازرسی چشمی است که از طریق آن می‌توان به بسیاری از عیوب نمونه جوشکاری شده پی برد. به طور کلی سطح ظاهری جوش‌ها از کیفیت بالایی برخوردار بود. عیوبی مانند حفره و ترک بر روی سطح نمونه‌ها مشاهده نشد. پس از اتمام فرایند در محل خروج ابزار اثر دایروی پین بر روی قطعه‌کار باقی ماند. این پدیده یکی از معایب جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است که در صورت کم بودن عمق نفوذ این اثر دایره‌ای شکل ابزار بر روی قطعه‌کار به صورت ناقص خواهد بود. سطح ظاهری نمونه‌های جوشکاری شده به روش FSW و UFSW به ترتیب در شکل‌های ۵-الف و ۵-ب نشان داده شده است. با بررسی شکل‌های ۵-الف و ۵-ب مشاهده می‌شود که سطح نمونه جوشکاری شده به روش FSW از کیفیت بالاتری در مقایسه با نمونه جوشکاری شده به روش UFSW برخوردار است. کیفیت سطحی پایین‌تر نمونه جوشکاری شده در UFSW نسبت به نمونه FSW را می‌توان ناشی از حرارت ورودی کم در اثر نرخ سرد شدن بالای ناحیه جوش در این روش در نظر گرفت.

تصویر درشت ساختاری مقطع در نمونه‌های جوشکاری شده به روش FSW و UFSW به ترتیب در شکل‌های ۶-الف و ۶-ب نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل‌ها مشاهده می‌شود هیچ‌گونه عیوب و ناپیوستگی در ناحیه اغتشاشی<sup>۱</sup> (SZ)

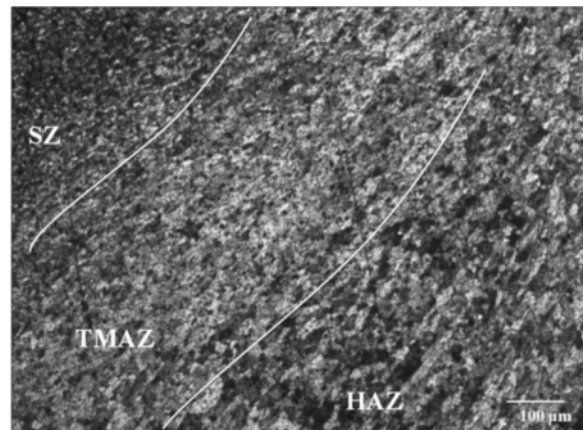
1. Stir Zone (SZ)

2. Thermal Mechanical Affected Zone (TMAZ)

3. Heat Affected Zone (HAZ)



شکل ۸ ریزساختار نمونه‌های الف- FSW، ب- UFSW، ج- BM



شکل ۹ ریزساختار نواحی مختلف ناحیه جوش در نمونه UFSW شامل نواحی SZ، TMAZ، HAZ

### ۳-۳- خواص کششی

در جدول ۳ نتایج استحکام کششی نمونه‌های حاصل از فرایند UFSW در سرعت‌های دورانی و پیشروی مختلف آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بالاترین استحکام کششی معادل  $201 \text{ MPa}$  است که در سرعت‌های دورانی و پیشروی به ترتیب  $80 \text{ rpm}$  و  $40 \text{ mm/min}$  حاصل شد.

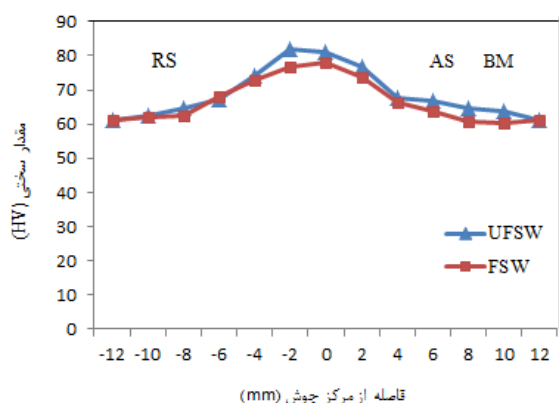
استحکام کششی نمونه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در هوا در شرایط مشابه یعنی با سرعت‌های دورانی و پیشروی به ترتیب  $80 \text{ rpm}$  و  $40 \text{ mm/min}$  برابر با  $195 \text{ MPa}$  و استحکام کششی فلز پایه  $204/9 \text{ MPa}$  اندازه‌گیری شد. با مقایسه نتایج استحکام کششی مشاهده می‌شود که استحکام کششی نمونه FSW معادل  $95\%$  فلز پایه است. درحالی که استحکام نمونه حاصل از فرایند UFSW معادل  $98\%$  فلز پایه است. این نتایج نشان می‌دهد که اولاً اتصال از طریق جوشکاری اصطکاکی از استحکام بالایی برخوردارند ثانیاً اتصال توسط فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب نسبت به نمونه مشابه در هوا دارای خواص مطلوب‌تری است.

موقعیت دقیق شکست جوشها در ازمون کشش در شکل ۹ نشان داده شده است که سطح پسرونده<sup>۲</sup> و سطح پیشرونده<sup>۳</sup> به ترتیب با RS و AS مشخص شده‌اند. از مقایسه نتایج جدول ۳ با شکل ۹ مشاهده می‌شود که مقدار استحکام کششی جوشکاری زیر آب با محل شکست آن هم خوانی کامل ندارد که دلیل آن می‌تواند ناشی از خطاهای اندازه‌گیری باشد.

ریزساختار آلیاژ آلومینیم  $5050$  و منطقه اغتشاش یافته (SZ) نمونه‌های جوشکاری شده در هوا و در زیر آب در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود ریزساختار ورق نورد شده اولیه دارای دانه‌های کشیده و خشن است که میانگین اندازه دانه آن  $203$  میکرومتر می‌باشد. اندازه دانه نمونه‌های جوشکاری شده به وسیله FSW و UFSW به ترتیب در حدود  $17/4$  و  $11/1$  میکرومتر اندازه‌گیری شد. با توجه به اینکه در حین انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ماده دچار تغییر شکل پلاستیکی شدید می‌شود، این عمل باعث افزایش عیوب کریستالی خواهد شد. اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کارها باعث افزایش دما در ناحیه اغتشاش می‌شود که این پدیده موجب تبلور مجدد شدید می‌گردد. نتیجه آن کاهش چگالی نابجائی‌ها، رشد و افزایش اندازه دانه خواهد بود که در نهایت کاهش سختی و استحکام را در این ناحیه را به دنبال دارد [۱۰-۱۲].

تغییر شکل پلاستیک مواد در جوشکاری زیر آب اگر چه تقریباً شبیه به جوشکاری در هوا است ولی به دلیل خنک‌کنندگی آب، دمای قطعه در اثر اصطکاک افزایش زیادی پیدا نکرد لذا این عمل باعث تبلور مجدد ضعیف در ناحیه اغتشاش می‌شود. به عبارت دیگر این پدیده سبب می‌شود که چگالی عیوب کاسته نشده و دانه‌ها رشد نکرده و ریز باقی بمانند. حاصل آن افزایش سختی و استحکام این نمونه‌های نسبت به نمونه‌های جوشکاری شده در هوا می‌باشد [۱۲، ۱۴].

1. Base Metal (BM)
2. Retreating Side
3. Advancing Side



شکل ۱۰ منحنی سختی نمونه‌های جوشکاری شده به روش FSW و UFSW

در اتصال ایجاد شده به روش FSW، حداقل محدوده سختی (HV ۶۲-۵۹) در منطقه TMAZ در قسمت AS اندازه‌گیری شد که با موقعیت شکست اتصال در آزمون کشش مطابقت دارد (شکل ۹). همچنین در نمونه جوشکاری شده به روش UFSW حداقل محدوده سختی (HV ۶۲-۶۰) در منطقه BM در قسمت AS تعیین شد که با محل شکست نمونه در آزمون کشش همخوانی دارد (شکل ۹). علت حصول سختی بالاتر در جوشکاری در زیر آب نسبت به نمونه مشابه در هوا می‌تواند مربوط به ایجاد ساختار ریزدانه‌تر در این روش باشد که در اثر سریع سرد شدن ناحیه جوش در حین فرایند به وقوع می‌پیوندد. در نهایت لازم به ذکر است که با انجام جوشکاری در زیر آب، میانگین سختی در ناحیه جوش نسبت به سختی ماده اولیه به مقدار ۳۰ درصد افزایش یافته است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تلاش شد مقایسه‌ای بین تغییرات ریزساختاری و خواص مکانیکی ناحیه جوشکاری آلیاژ آلومینیم ۵۰۵۰ به روش اصطکاکی اغتشاشی در هوا و در زیر آب بعمل آمد. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- در اثر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیم اولیه که دارای دانه‌های کشیده و خشن به طول متوسط ۲۰۳ میکرومتر ناشی از کارسرد بود به ریزساختاری شامل دانه‌های ریز و هم محور تبدیل شده است.
- ۲- نمونه جوشکاری شده در هوا نسبت به زیر آب از کیفیت و صافی سطح بالاتر برخوردار است.

جدول ۳ استحکام کششی نمونه‌های UFSW در سرعت‌های دورانی و پیشروی مختلف

| استحکام کششی (MPa) | سرعت پیشروی (mm/min) | سرعت دورانی (rpm) |
|--------------------|----------------------|-------------------|
| ۱۹۲/۳              | ۳۱/۵                 | ۶۱۰               |
| ۵۴/۰               | ۴۰                   | ۶۱۰               |
| ۵۰/۶               | ۶۳                   | ۶۱۰               |
| ۷۹/۷               | ۳۱/۵                 | ۸۰۰               |
| ۲۰۱/۱              | ۴۰                   | ۸۰۰               |
| ۱۸۷/۶              | ۶۳                   | ۸۰۰               |
| ۳۸/۴               | ۳۱/۵                 | ۱۰۰۰              |
| ۱۹۱/۰              | ۴۰                   | ۱۰۰۰              |
| ۱۸۶/۰              | ۶۳                   | ۱۰۰۰              |



شکل ۹ موقعیت وقوع شکست نمونه‌های جوشکاری شده به روش الف- FSW، ب- UFSW

#### ۳-۴- ریزسختی

قبل از بررسی نتایج ریزسختی سنجی لازم به ذکر است که در آلیاژهای آلومینیم عملیات حرارتی‌ناپذیر، عامل مهمی که می‌تواند موجب افزایش سختی شود کار سختی است که وابستگی زیادی به سطح مرزدانه‌ها دارد. پدیده اخیر به عنوان مانع مؤثر در مقابل نابجایی‌های متحرک عمل می‌کند. در نتیجه کاهش شدید اندازه دانه در اثر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌تواند منجر به افزایش سختی در محل اتصال آلیاژهای آلومینیم شود. منحنی توزیع سختی روی مقطع نمونه‌های جوشکاری شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که میانگین سختی اندازه‌گیری شده ورق آلومینیم اولیه برابر ۶۱ ویکرز بوده است.

با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که سختی در هر دو نمونه جوشکاری شده نسبت به فلز پایه افزایش پیدا کرده است که علت آن تحولات ریزساختاری صورت گرفته در حین فرایند جوشکاری می‌باشد که سبب کاهش شدید اندازه دانه در ناحیه جوش شده است.

- ۳- با انجام فرایند جوشکاری در زیر آب اندازه دانه به میزان ۳۶ درصد نسبت به جوشکاری در هوا کاهش بیشتری یافت.
- ۴- انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب نسبت به حالت آن در هوا سبب ارتقای خواص کششی اتصال می شود.
- ۵- نمونه جوشکاری شده در زیر آب در آزمون کشش از فلز پایه، و نمونه جوشکاری شده در هوا از منطقه TMAZ شکسته شدند که حاکی از بالاتر بودن خواص کششی اتصال نمونه جوشکاری شده در زیر آب می باشد.
- ۶- نمونه جوشکاری شده در زیر آب از سختی بالاتری نسبت به نمونه جوشکاری شده در هوا برخوردار است که کاهش اندازه دانه این موضوع را تأیید می کند.
- ### ۵- مراجع
- [1] Matrukanitz R.P., "Selection and Weldability of Heat treatable Aluminum Alloys", *ASM Handbook, Welding, Brazing and Soldering*, Vol.6, 1990, pp 528-536.
- [2] Mishra R.S., Ma Z.Y, Friction Stir Welding and Processing", *Materials Science and Engineering R: Vol. 50*, 2005, pp. 1-78
- [3] Svensson L.E, Karlsson L., Larsson H., Karlsson B., Fazzini M., "Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Aluminium Alloys with Special Reference to AA 5083 and AA 6082". *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol.5, No.5, 2000, p.p 285-296.
- [4] Starink J., Seschamps M.A., Wang S.C., "The Strength of Friction Stir Welded and Friction Stir Processed Aluminium Alloys", *Journal of Scripta Materialia*, Vol. 58, No. 5, 2008, pp. 377-382.
- [5] Hofmann D. C., Vecchio K. S., "Submerged Friction Stir Processing (SFSP), an Improved Method for Creating Ultra-fine-grained Bulk Materials", *Materials Science & Engineering A* 402, 2005, pp. 234-241.
- [6] Sarukada D., Katoh K., Tokisue H., "Underwater FrictionWelding of 6061 Aluminum Alloy", *Journal of Japan Institute of Light Metals*, Vol. 52, No. 1, 2002, pp. 2-6.
- [7] FratiniL., BuffaG., ShivpuriR., "In-process Heat Treatments to Improve FS-Welded Butt Joints," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 10, No. 3, 2008, pp. 42-53.
- [8] Mofid, M.A, Abdollah-zadel,A., MalekGhaini, "The effect of water cooling during dissimilar friction stir welding of Al alloy to Mg alloy", *Materials and Design*, Vol. 36, 2012, pp. 161-167.
- [9] ASTM, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Material", E8, Vol. 03.01, 2004
- [10] Li Y., Murr L.E., McClure J.C. "Low Temperature Friction Stir Welding of 2024Aluminum",. *Mater. Sci. Eng. A* 271, 1999, pp. 213-220.
- [11] Murr L.E., Li Y., Flores R.D., Trillo E.A., "Intercalation Vorticesand Related Microstructural Features inthe Friction-Stir Welding of Dissimilar", *Metals Mater. Res. Innovat.* Vol. 2, 1998, pp. 150-163.
- [12] Kwon, Y.J., I. Shigematsu, N. S. "Mechanical Properties of Fine-Grained Aluminum Alloy Produced by Friction Stir Process", *Scripta Mater.* Vol. 49, 2003, pp. 785-789.
- [13] Jata K.V., SemiatinS.L. "Continuous Dynamic Recrystallization During Friction StirWelding of High Strength Aluminum Alloy", *Scripta Mater.* Vol. 43, No. 743, 2000.
- [14] Su J.Q., Nelson W.T., SterlingC.J."Microstructure Evolution during FSW/FSP of High Strength Aluminum Alloys", *Mater.Sci. Eng.A* 405, 2005, pp. 277-286.
- [15] Bauri R., Yadav D., Suhas G., "Fabrication of Metal Particles Embedded Aluminum Matrix Composite by Friction Stir Processing. Materials", *Science and Engineering A* 528, 2011, pp. 4732-4739.
- [16] Bloodworth T., Cook G., Strauss A., "Properties and Forces of Immersed Iriction Stir Welded AA6061-T6", *8th International Conference of Trends in Welding Technology, Pine Mountain, GA.*, 2008, pp. 1-5.