

# تأثیر پارامترهای فرایند جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی و ابزار روی خواص مکانیکی اتصالات آلیاژ آلمینیوم 7075-T6

عبدالحمید عزیزی<sup>۱\*</sup>، وحید ذاکری مهرآباد<sup>۲</sup>، افشین مستوفی زاده<sup>۳</sup>، رضا آذرافزا<sup>۴</sup>

۱- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۲- مری گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، سنتندج

۴- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

\* کرمانشاه، ۶۷۱۴۹۶۷۳۴۶ ah.azizi@razi.ac.ir

**چکیده-** آلیاژهای آلمینیوم هوا فضا قابلیت جوش‌کاری پایینی را در روش‌های جوش‌کاری معمول ذوبی نشان می‌دهند. پیشرفت جوش‌کاری اغتشاشی یک روش بهبود یافته دیگر برای جوش‌کاری اتصالات آلمینیومی فراهم کرده است. در تحقیق حاضر تأثیر پارامترهای فرایند و ابزار روی خواص مکانیکی اتصالات آلیاژ آلمینیوم 7075-T6 که به روش جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی تولید شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. اتصالات با تغییر دادن پارامترهای فرایند و پارامترهای ابزار، تولید شده است. خواص مکانیکی اتصالات اندازه‌گیری شده و با ریز ساختار و سختی منطقه اغتشاش ارتباط داده شده است. نتیجه بدست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که اتصالات تولید شده در سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور در دقیقه و سرعت جوش‌کاری ۶۰ میلی‌متر در دقیقه با استفاده از ابزاری با قطر شانه ۱۵ میلی‌متر، قطر پین ۵ میلی‌متر، سختی ابزار ۴۵ راکول C، خواص مکانیکی بالاتری بدست می‌دهد.

**کلیدواژگان:** جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی، سرعت دورانی، سرعت جوش‌کاری، آلیاژ آلمینیوم.

## Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminum alloy joints

A.H. Azizi<sup>1\*</sup>, V. Zakeri Mehrabad<sup>2</sup>, A. Mostofi Zadeh<sup>3</sup>, R. Azarafza<sup>4</sup>

1- Assist. Prof., Mech. Eng., Razi Univ., Kermanshah, Iran

2- MSc in Manufacturing Eng., Islamic Azad Univ., Tabriz Branch, Tabriz, Iran

3- MSc Student of Mech. Eng., Islamic Azad Univ., Science and Research Branch, Sanandaj, Iran

1- Assist. Prof., Malek Ashtar Univ. of Tech., Tehran, Iran

\* P.O.B. 6714967346 Kermanshah, Iran. ah.azizi@razi.ac.ir

**Abstract-** The aircraft aluminum alloys generally present low weldability by traditional fusion welding process. The development of the friction stir welding has provided an improved way of producing aluminum joints. In this present work the influence of process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 joints produced by friction stir welding was analyzed. Joints were fabricated by varying process parameters and tool parameters. Strength properties of the joints were evaluated and correlated with the microstructure and hardness of weld nugget. This investigation demonstrates, Joints fabricated at rotational speed of 1400 rpm and welding speed of 60 mm/min using the tool with 15mm shoulder diameter, 5mm pin diameter and 45 HRc tool hardness ,yielded higher strength properties.

**Keywords:** Friction Stir Welding, Rotational Speed, Welding Speed, Aluminum Alloy.

خواص مکانیکی اتصالات جوشکاری شده انجام گرفته است. موضوع اصلی بسیاری از تحقیق‌ها یافتن شرایط بهینه پارامترهای فرایند برای اتصالات و تأثیر این پارامترها روی خواص اتصالات بوده است. تأثیر برجسته از پارامترها نظری نیروی محوری، سرعت دورانی و سرعت جوشکاری بر روی خواص جوش بررسی شده است. تأثیر مجموع پارامترهای فرایند و پارامترهای ابزار روی خواص اتصال گزارش نشده است. از این رو در این تحقیق تلاش شده است تأثیر پارامترهای ابزار و پارامترهای فرایند روی خواص مکانیکی و تشکیل منطقه اغتشاش برای اتصالات آلیاژ آلمینیوم ۷۰۷۵ بررسی شود.

## ۲- کار تجربی

ورق‌های نورد شده به ضخامت ۵ میلی‌متر از آلیاژ آلمینیوم T6-7075 در اندازه مورد نظر ۱۰۰ میلی‌متر در ۱۰۰ میلی‌متر برشیده شد. اتصال لب به لب مستطیلی و جهت جوشکاری، عمود بر جهت نورد فلز پایه انتخاب شد. جوش تک مرحله ای برای ایجاد اتصال انجام گرفت. خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی فلز پایه در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

**جدول ۱** خواص مکانیکی فلز پایه

| مقادیر مکانیکی     | مقادیر فلز پایه |
|--------------------|-----------------|
| استحکام تسلیم      | ۴۱۰ MPa         |
| استحکام کششی نهایی | ۴۸۵ MPa         |
| درصد ازدیاد طول    | %۱۲             |
| سختی ویکرز         | ۱۶۰             |

**جدول ۲** درصد وزنی ترکیب شیمیایی آلیاژ آلمینیوم ۷۰۷۵

| عنصر | درصد وزنی |
|------|-----------|
| Mg   | ۲/۱       |
| Mn   | ۰/۱۲      |
| Zn   | ۵/۱       |
| Fe   | ۰/۳۵      |
| Cu   | ۱/۲       |
| Si   | ۰/۵۸      |
| Al   | باقیمانده |

اصطلاحات و ابعاد ابزار جوشکاری بصورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. جنس ابزار از فولاد ابزار

## ۱- مقدمه

آلیاژ آلمینیوم ۷۰۷۵ یکی از سختترین آلیاژهایی است که امروزه در صنعت کاربرد دارد. نسبت استحکام به وزن بالا، این آلیاژ را برای سازه‌های هوافضا بسیار مناسب و مورد توجه می‌گردد [۱]. مشکل بزرگ در مورد این آلیاژ عدم جوش پذیری ذوبی آن است. این آلیاژ بسیار حساس به ترک ایجاد شده در هنگام انجماد ذوب و ترک ایجاد شده هنگام ذوب منطقه متأثر از حرارت، به دلیل حضور مس است. هرچند که حل مشکل ترک در هنگام انجماد با استفاده از فیلر آلیاژ آلمینیوم غیر قابل عملیات حرارتی، امکان پذیر است ولی اتصالات ایجاد شده کارایی پایین و غیر قابل قبولی دارند [۲]. به علاوه اکسیداسیون و تبخیر فلز روى مشکلات زیادی در حین جوشکاری از جمله تخلخل، ذوب و اتصال ناکافی و بخارات خطرناک ایجاد می‌کند. بنابراین استفاده از آلیاژ آلمینیوم ۷۰۷۵ به مواردی محدود شده بود که نیاز به جوشکاری نداشته باشد [۳].

در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک ابزار چرخشی در طول اتصال حرکت می‌کند و با تولید حرارت باعث ایجاد چرخه‌ای از جریان مواد پلاستیکی در نزدیکی سطح ابزار می‌شود [۴]. تشکیل منطقه اغتشاش، تحت تأثیر جریان مواد توسط ابزار چرخشی است. هرچند که جریان مواد خود تحت تأثیر خواص ماده مانند استحکام تسلیم، شکل پذیری، سختی فلز پایه، طراحی ابزار و پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است. در مقایسه با جوشکاری ذوبی، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، واپیچش و مقدار تنفس پسماند را کاهش می‌دهد [۵-۷]. تأثیر ساقمه زنی و اصطکاک روی ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوشکاری شده آلیاژ آلمینیوم ۷۰۷۵ بررسی و گزارش شده است [۸]. یافته‌های اخیر نشان می‌دهد که دانه‌ها در منطقه اغتشاش به حالت سه بعدی متساوی المحور نبوده بلکه به حالت ۲ بعدی میله مانند هستند [۹]. ساختار دانه در منطقه متأثر از حرارت - کار مکانیکی، دچار افزایش طول و اعوجاج ناشی از کار مکانیکی ابزار شده است. منطقه متأثر از حرارت تحت تأثیر کار مکانیکی ناشی از ابزار قرار نگرفته و ساختار دانه در این منطقه شبیه ساختار دانه فلز پایه است. تلاش‌های زیادی برای بررسی تأثیر پارامترهای فرایند روی جریان مواد و تشکیل ریز ساختار و

جدول ۴ پارامترهای فرایند

| پارامتر<br>(mm/min) | سرعت دورانی<br>(rpm) | سرعت جوش کاری<br>(rpm) | فرایند |
|---------------------|----------------------|------------------------|--------|
| ۲۰                  |                      | ۱۲۰۰                   |        |
| ۴۰                  |                      | ۱۳۰۰                   |        |
| ۶۰                  |                      | ۱۴۰۰                   | مقادیر |
| ۸۰                  |                      | ۱۵۰۰                   |        |

جدول ۵ پارامترهای ابزار

| سختی ابزار<br>$H$ (HRc) | قطر پین<br>$d$ (mm) | قطر شانه<br>$D$ (mm) | پارامتر<br>ابزار |
|-------------------------|---------------------|----------------------|------------------|
| ۳۳                      | ۳                   | ۹                    |                  |
| ۴۰                      | ۴                   | ۱۲                   |                  |
| ۴۵                      | ۵                   | ۱۵                   | مقادیر           |
| ۵۰                      | ۶                   | ۱۸                   |                  |



شکل ۲ نمونه جوش انجام گرفته بعد از آزمون کشش استاندارد

آزمون کشش تحت بار ۱۰۰ کیلو نیوتن و با سرعت کلگی ۰/۵ میلی متر در دقیقه در دمای اتاق صورت گرفته است. نمونه‌ها برای آزمون متالوگرافی به تکه‌هایی تقسیم شدند که بخش‌های اغتشاش، منطقه متاثر از حرارت - کار مکانیکی، منطقه متاثر از حرارت و فلز پایه را شامل می‌شد. سپس این تکه‌ها توسط کاغذ سمباده با دانه‌بندی‌های مختلف پلیش کاری و در نهایت پلیش آخر با ترکیبات الماسی توسط دستگاه پولیش دیسکی انجام شد. نمونه‌های پلیش شده توسط محلول ۱۰ درصد هیدروکسید سدیم اچ گردیدند تا ساختار آلیاژ مشخص شود. بعد از آشکارسازی، ساختار اتصال توسط میکروسکوپ نوری به همراه نرم‌افزار تحلیل گر مورد آنالیز قرار گرفت.

### ۳- نتایج

#### ۱-۳ - ساختار ماکرو

جدول ۶ تا ۱۰ تأثیر پارامترهای فرایند و ابزار را روی ساختار

AISI H13 انتخاب شده است. این نوع فولاد، از انواع گرم کار فولاد ابزار می‌باشد، که در جدول ۳ ترکیب شیمیایی آن ارائه شده است. سختی‌های مختلف با استفاده از عملیات حرارتی و کوئنچ در مواد مختلف شامل روغن، آب نمک و آب بدست آمد.



شکل ۱ شکل، ابعاد و اصطلاحات ابزار

پارامترهای فرایند در جدول ۴ و پارامترهای ابزار در جدول ۵ نشان داده شده است. اتصالات جوش کاری شده به تکه‌هایی در ابعاد مورد نیاز برای آزمون کشش بریده شده و سپس ماشین کاری شدند. نمونه‌ها برای آزمون کشش طبق استاندارد [۱۰] آماده شدند که نمونه‌ای از جوش انجام گرفته به همراه ظاهر جوش بعد از انجام آزمون کشش در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۳ درصد وزنی ترکیب فولاد ابزار

| C    | Mn  | Si   | Cr  | V    | Mo   |
|------|-----|------|-----|------|------|
| ۰/۳۵ | ۰/۴ | ۰/۹۶ | ۴/۸ | ۰/۹۵ | ۱/۱۳ |

کرد. اتصالات تولید شده با سرعت جوشکاری ۶۰ میلی‌متر در دقیقه بدون عیب است.

جدول ۶ تأثیر سرعت دورانی روی خواص مکانیکی

سرعت جوشکاری ۶۰ mm/min - قطر پین ۵ mm  
قطر شانه ۱۵ mm - سختی ابزار ۴۵ HRC

| خواص مکانیکی         | سرعت دورانی<br>(دور در دقیقه) | تصویر مقطع |
|----------------------|-------------------------------|------------|
| $YS=245 \text{ MPa}$ |                               |            |
| $TS=270 \text{ MPa}$ | ۱۲۰۰                          |            |
| $H=175 \text{ VH}$   |                               |            |
| $YS=290 \text{ MPa}$ |                               |            |
| $TS=310 \text{ MPa}$ | ۱۳۰۰                          |            |
| $H=191 \text{ VH}$   |                               |            |
| $YS=314 \text{ MPa}$ |                               |            |
| $TS=372 \text{ MPa}$ | ۱۴۰۰                          |            |
| $H=203 \text{ VH}$   |                               |            |
| $YS=314 \text{ MPa}$ |                               |            |
| $TS=367 \text{ MPa}$ | ۱۵۰۰                          |            |
| $H=202 \text{ VH}$   |                               |            |

جدول ۷ تأثیر سرعت جوشکاری روی خواص مکانیکی

سرعت دورانی ۱۴۰۰ rpm - قطر پین ۵ mm  
قطر شانه ۱۵ mm - سختی ابزار ۴۵ HRC

| خواص<br>مکانیکی       | سرعت جوشکاری<br>(میلی‌متر در دقیقه) | تصویر مقطع |
|-----------------------|-------------------------------------|------------|
| $YS=225 \text{ MPa}$  |                                     |            |
| $TS=280 \text{ MPa}$  | ۲۰                                  |            |
| $H=180 \text{ VH}$    |                                     |            |
| $YS=279 \text{ MPa}$  |                                     |            |
| $TS=363 \text{ MPa}$  | ۴۰                                  |            |
| $H=194 \text{ VH}$    |                                     |            |
| $YS=310 \text{ MPa}$  |                                     |            |
| $TS=372 \text{ MPa}$  | ۶۰                                  |            |
| $H=198 \text{ VH}$    |                                     |            |
| $YS=30.8 \text{ MPa}$ |                                     |            |
| $TS=371 \text{ MPa}$  | ۸۰                                  |            |
| $H=197 \text{ VH}$    |                                     |            |

اتصال نشان می‌دهد. به طور طبیعی مشخص است که جوشکاری ذوبی آلیاژهای آلومینیوم همراه با عیوبی مانند تخلخل، آخال، سرباره، ترک هنگام جامد شدن و موارد دیگری است که کیفیت جوش و خواص اتصال را کاهش می‌دهد. عموماً در اتصالاتی که توسط جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ایجاد می‌شوند عیوب ناشی از انجاماد وجود ندارد، چرا که در طول جوشکاری هیچ گونه عمل ذوب اتفاق نمی‌افتد و فلزات در حالت جامد تحت تأثیر حرارت ایجاد شده توسط اصطکاک و جریان مواد تحت تأثیر اغتشاش به هم متصل می‌شوند. هرچند که اتصالات تولید شده به روش اصطکاکی اغتشاشی نیز در معرض عیوب دیگری مانند سوراخ پین، عیوب تونل، عیوب مکوله‌ای، باند اتصال ضعیف، خط زیگ‌زاگ و ترک به خاطر جریان نامناسب مواد و اتصال و به هم پیوستن ناکافی فلزات در منطقه اغتشاش است.

باند ضعیف اتصال به معنای اجزای باقیمانده از سطح اتصال جوشکاری نشده زیر منطقه اغتشاش است که ایجاد آن در اثر تماس ناکافی ابزار با سطح در طول جوشکاری است. مکانیزم تولید آن مربوط به شکستن نامناسب و ناکافی لایه اکسید به علت کشش نامناسب و ناکافی سطوح تماس نزدیک پین جوشکاری است. کاهش گرمای ورودی باعث شکستن ناکافی و نامناسب لایه اکسید در طول جوش می‌شود. یک احتمال زیاد وجود دارد که شکست مناسب و کافی لایه اکسید در ریشه جوش هم بدست نمی‌آید. مشاهده شده است که لایه اکسید ادامه‌دار که به خاطر اغتشاش ناکافی ایجاد می‌شود در سطح آغازین اتصال لب به لب می‌تواند به صورت مستقیم و بدون پیوند فلزی بین سطح آزاد اکسید در ریشه جوش بهم متصل شود.

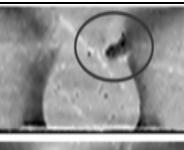
تمام اتصالات ایجاد شده در این تحقیق توسط میکروسکوپ با بزرگنمایی بالا آزمایش شده‌اند تا کیفیت جوش منطقه اغتشاش نشان داده شود. ماکروگرافی مقطعی اتصالات در جداول ۶ تا ۱۰ نشان داده شده است. زمانی که پارامترهای نامناسب جوش استفاده می‌شود مواد پلاستیکی (نرم شده) نمی‌توانند از قسمت پس رو نزدیک سطح پشتی ابزار به قسمت پیش رو منتقل شوند. در نتیجه عیوب سوراخ پین در سطح پیش رو ایجاد می‌شود که باعث کاهش خواص مکانیکی می‌شود. از ۴ سرعت دورانی انتخاب شده برای تولید اتصالات، سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور در دقیقه اتصالات بدون عیوب تولید

نتیجه حاصل می‌شود که تشکیل منطقه اغتشاش بدون عیب، متأثر از پارامترهای جوشکاری و ابزار است. در این جداول  $YS$  و  $TS$  به ترتیب استحکام تسليم و استحکام کششی را بر حسب مگاپاسکال و  $H$  سختی ویکرز را نشان می‌دهد.

#### جدول ۱۰ تأثیر سختی ابزار روی خواص مکانیکی

سرعت دورانی ۱۴۰۰ rpm - سرعت جوشکاری ۶۰ mm/min

قطر شانه ۵ mm - قطر پین ۱۵ mm

| خواص مکانیکی         | سختی ابزار (HRc) | تصویر مقطع  |
|----------------------|------------------|---|
| $YS=221 \text{ MPa}$ |                  |   |
| $TS=299 \text{ MPa}$ | ۳۳               |    |
| $H=178 \text{ VH}$   |                  |   |
| $YS=261 \text{ MPa}$ |                  |   |
| $TS=283 \text{ MPa}$ | ۴۰               |   |
| $H=186 \text{ VH}$   |                  |   |
| $YS=313 \text{ MPa}$ |                  |   |
| $TS=372 \text{ MPa}$ | ۴۵               |  |
| $H=198 \text{ VH}$   |                  |   |
| $YS=310 \text{ MPa}$ |                  |   |
| $TS=368 \text{ MPa}$ | ۵۰               |  |
| $H=192 \text{ VH}$   |                  |   |

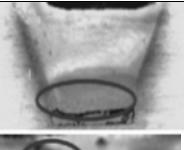
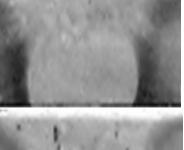
#### ۲-۳- ریز ساختار

فلز پایه مورد نظر، آلیاژ آلمینیوم و روی است که تحت عملیات حرارتی  $T_6$  قرار گرفته است که این عملیات شامل انحلال و کوئنچ در آب و پیر سازی مصنوعی است. در این حالت پدیده سخت شدن رسوبات  $MgZn_2$  اتفاق می‌افتد. ریز ساختار فلز پایه از رسوبات یوتکتیک سوزنی شکل  $MgZn_2$  متداخل در زمینه آلمینیوم آلفا تشکیل شده است. باید گفت که دانه‌های افزایش طول پیدا کرده حتی در فلز پایه با یک ارتباط خاص با مرکز اتصال، نیز مشاهده می‌شوند. شکست قابل توجه  $MgZn_2$  در شرایط بهینه از پارامترهای جوشکاری و ابزار، توزیع یکنواخت ذرات  $MgZn_2$  را در زمینه آلمینیوم آلفا به همراه دارد. این موضوع به خاطر عمل اغتشاش در حالت پلاستیک فلز در طول جوشکاری است. بدون در نظر گرفتن شرایط جوشکاری، درشت دانه شدن و خوشبندی شدیدی در

#### جدول ۸ تأثیر قطر شانه روی خواص مکانیکی

سرعت دورانی ۱۴۰۰ rpm - سرعت جوشکاری ۶۰ mm/min

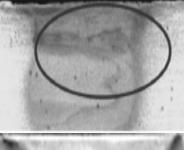
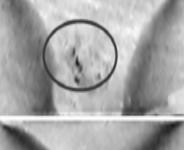
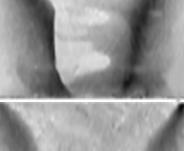
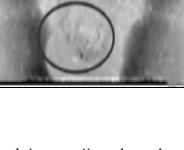
قطر پین ۵ mm - سختی ابزار ۴۵ HRc

| خواص مکانیکی         | قطر شانه (mm) | تصویر مقطع   |
|----------------------|---------------|--|
| $YS=242 \text{ MPa}$ |               |   |
| $TS=266 \text{ MPa}$ | ۹             |  |
| $H=178 \text{ VH}$   |               |  |
| $YS=280 \text{ MPa}$ |               |   |
| $TS=210 \text{ MPa}$ | ۱۲            |  |
| $H=193 \text{ VH}$   |               |  |
| $YS=310 \text{ MPa}$ |               |   |
| $TS=372 \text{ MPa}$ | ۱۵            |  |
| $H=198 \text{ VH}$   |               |  |
| $YS=356 \text{ MPa}$ |               |  |
| $TS=350 \text{ MPa}$ | ۱۸            |  |
| $H=178 \text{ VH}$   |               |  |

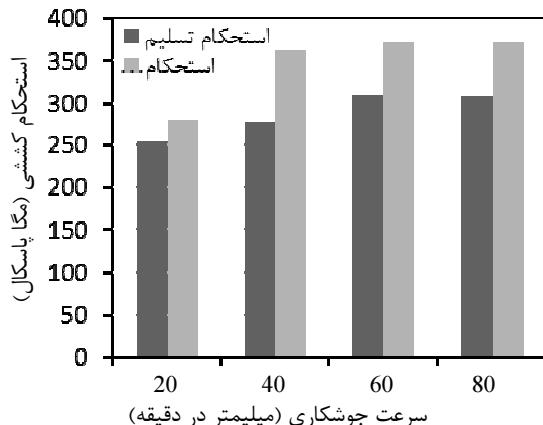
#### جدول ۹ تأثیر قطر پین روی خواص مکانیکی

سرعت دورانی ۱۴۰۰ rpm - سرعت جوشکاری ۶۰ mm/min

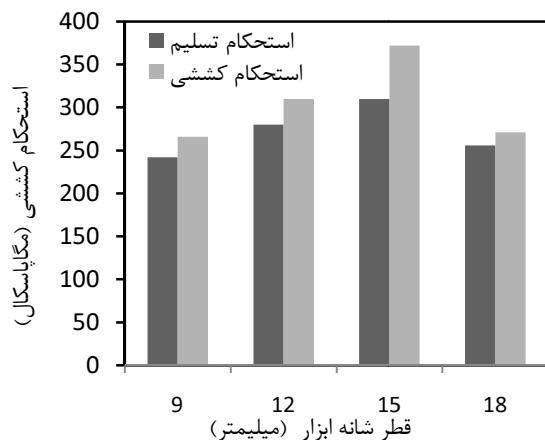
قطر شانه ۱۵ mm - سختی ابزار ۴۵ HRc

| خواص مکانیکی         | قطر پین (mm) | تصویر مقطع  |
|----------------------|--------------|---|
| $YS=264 \text{ MPa}$ |              |  |
| $TS=281 \text{ MPa}$ | ۳            |   |
| $H=181 \text{ VH}$   |              |   |
| $YS=292 \text{ MPa}$ |              |  |
| $TS=331 \text{ MPa}$ | ۴            |   |
| $H=194 \text{ VH}$   |              |   |
| $YS=310 \text{ MPa}$ |              |  |
| $TS=372 \text{ MPa}$ | ۵            |   |
| $H=198 \text{ VH}$   |              |   |
| $YS=300 \text{ MPa}$ |              |  |
| $TS=340 \text{ MPa}$ | ۶            |   |
| $H=197 \text{ VH}$   |              |   |

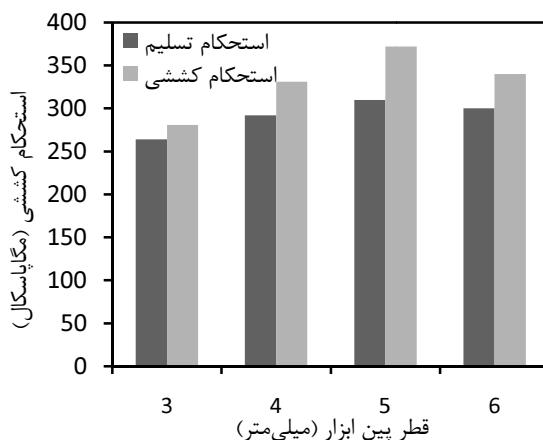
تولید اتصالات با استفاده از ابزاری با قطر شانه ۱۵ میلی‌متر و قطر پین ۵ میلی‌متر و سختی ابزار ۴۵HRc کاملاً عاری از هرگونه عیب در ساختار ماکروست. با آنالیز ماکروساختار این



شکل ۵ تأثیر سرعت جوشکاری روی خواص مکانیکی



شکل ۶ تأثیر قطر شانه ابزار روی خواص مکانیکی



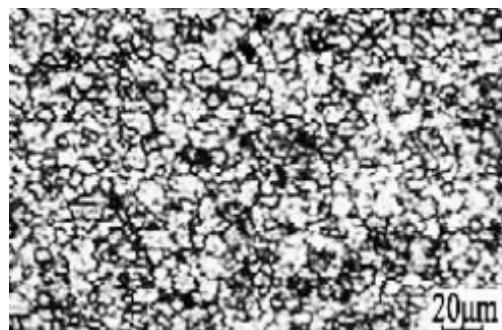
شکل ۷ تأثیر قطر پین ابزار روی خواص مکانیکی

ریز سختی در ضخامت میانی و در طول جوش اندازه‌گیری شده و مقادیر آن در اشکال ۹ تا ۱۳ نشان داده شده است.

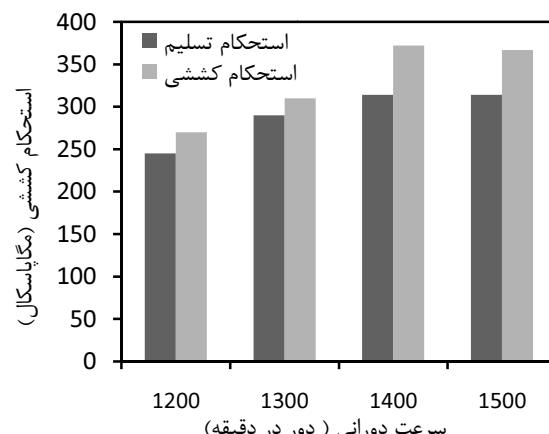
مجاورت مقطع شکست ناشی از کشش در نمونه‌های جوشکاری شده مشاهده شده است. شکل ۳ ریز ساختار مربوط به اتصال جوشی که منجر به حصول ۷۷ درصد استحکام فلز پایه شده است را نشان می‌دهد.

### ۳-۳- خواص مکانیکی

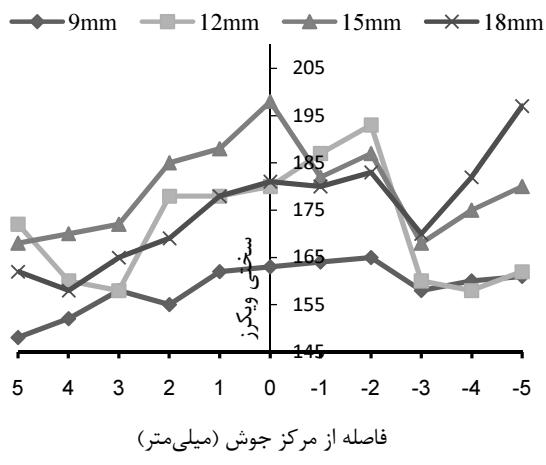
خواص مکانیکی کششی عرضی اتصالات در شکل‌های ۴ تا ۸ نشان داده شده است. ۳ نمونه برای هر یک از شرایط تحت آزمایش قرار گرفته و میانگین ۳ نتیجه در شکل نشان داده شده است. راندمان یا کارایی اتصال به عنوان نسبت استحکام کششی اتصال به استحکام کششی فلز پایه بیان شده است. با توجه به اشکال نشان داده شده می‌توان گفت اتصالاتی که در سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور در دقیقه، سرعت جوشکاری ۶۰ میلی‌متر در دقیقه و همچنین با استفاده از ابزاری با قطر شانه ۱۵ میلی‌متر، قطر پین ۵ میلی‌متر و سختی 45HRC جوشکاری شده‌اند، دارای بهترین خواص مکانیکی هستند.



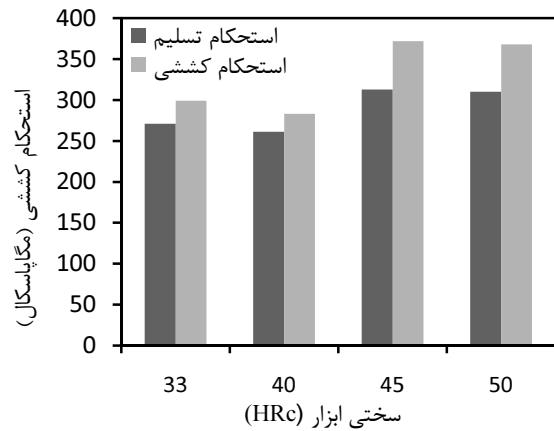
شکل ۳ ریزساختار جوش در سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور در دقیقه و سرعت جوشکاری ۶۰ میلی‌متر در دقیقه



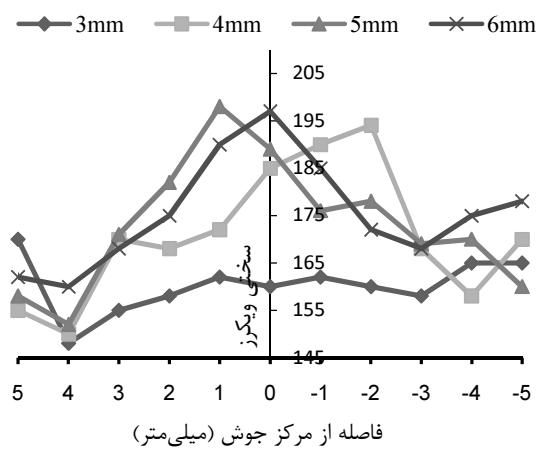
شکل ۴ تأثیر سرعت دورانی روی خواص مکانیکی



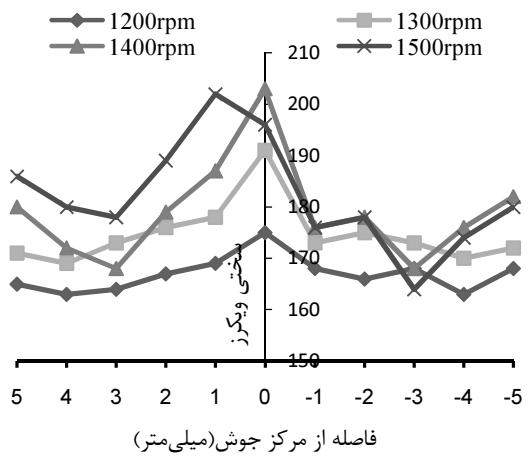
شکل ۱۱ تأثیر قطر شانه روی ریز سختی



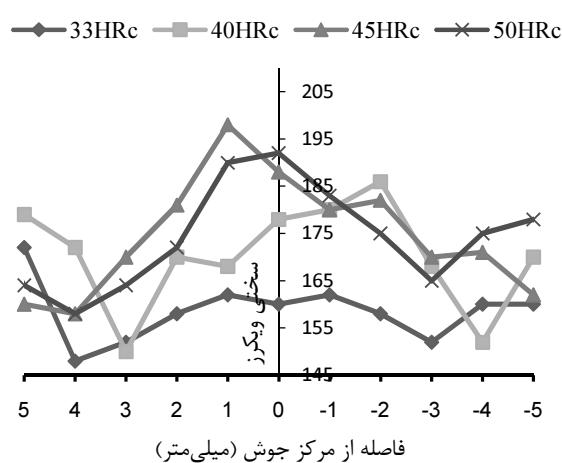
شکل ۸ تأثیر سختی ابزار روی خواص مکانیکی



شکل ۱۲ تأثیر قطر پین روی ریز سختی

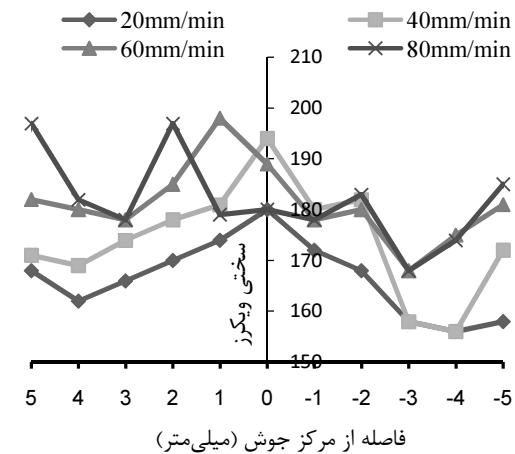


شکل ۹ تأثیر سرعت دورانی روی ریز سختی



شکل ۱۳ تأثیر سختی ابزار روی ریز سختی

سختی منطقه اغتشاش بدون در نظر گرفتن سرعت دورانی



شکل ۱۰ تأثیر سرعت جوش کاری روی ریز سختی

سختی فلز پایه ۱۶۰ ویکرز ثبت شده است که این مقدار کمتر از مقدار منطقه اغتشاش و بیشتر از منطقه متأثر از حرارت-کار مکانیکی است.

سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور در دقیقه در مقایسه با سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور در دقیقه استحکام کششی کمتری را حاصل می‌کنند. در نهایت می‌توان گفت که از بین ۴ سرعت دورانی مختلف سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور در دقیقه موجب دستیابی به خواص مکانیکی بهتری می‌شود.

بیان شده است که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با افزایش سرعت دورانی گرمای ورودی نیز افزایش می‌یابد [۱۲]. هرچند که بیشینه دما در تمام سرعت‌های دورانی نزدیک به هم اندازه‌گیری شده است. این پدیده می‌تواند با دو دلیل زیر بیان شود:

اول این که ضرب اصطکاک زمانی که ذوب موضعی اتفاق می‌افتد کاهش می‌یابد. دوم این که گرمای نهان مقداری از حرارت ورودی را جذب می‌کند. زمانی که سرعت دورانی افزایش می‌یابد حرارت ورودی به منطقه اغتشاش، به دلیل حرارت بالای ناشی از اصطکاک افزایش می‌یابد که این نیز به نوبه خود باعث اغتشاش و اختلاط بیشتر مواد می‌شود. وقتی سرعت دورانی از ۱۲۰۰ به ۱۴۰۰ دور در دقیقه افزایش پیدا می‌کند هم استحکام و هم راندمان اتصال بهبود می‌یابد و به یک مقدار ماقریزم، قبل از کاهش دوباره در سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه، می‌رسد. سرعت دورانی بالا باعث ایجاد حرارت بیشتر و در نتیجه راه یافتن مواد اغتشاش یافته به قسمت بالاتر می‌شود که این خود باعث ایجاد ریز تهی جای در منطقه اغتشاش می‌شود. به علاوه گرمای زیادی که تولید می‌شود سرعت سرد شدن را کاهش می‌دهد که باعث ایجاد دانه‌های درشت در منطقه اغتشاش و در نهایت سختی کمتر می‌شود [۱۳]. بنابراین تأثیر کلی دانه‌های درشت، سختی کم و بوجود آمدن میکرو تهی جای‌ها، خواص کششی اتصالات تولید شده در ۱۵۰۰ دور در دقیقه را در مقایسه با اتصالات ایجاد شده در سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور در دقیقه کاهش می‌دهد. اتصالات تولید شده در سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور در دقیقه تولید دانه‌های بهتر با توزیع جای خالی یکنواخت‌تر با سختی ۲۰۳ ویکرز در منطقه اغتشاش می‌کند و این یکی از دلایل برای خواص مکانیکی بالای این اتصالات است.

#### ۴-۱- تأثیر سرعت دورانی

استفاده شده، از فلز پایه بیشتر است. ریز شدن دانه‌ها نقش بسیار مهمی در سختی مواد ایفا می‌کند. حین فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم اعم از انواع عملیاتی حرارتی پذیر و غیر قابل عملیات حرارتی، ناحیه ناگت ریزساختاری تبلور مجدد یافته از خود نشان می‌دهد که در مورد آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر آلمینیوم، وجود دماهای کاری بالا حین فرایند در ناحیه ناگت و مقدار جزئی در ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی، موجب انحلال بخشی از فازهای رسوبی می‌شوند. در نتیجه مقداری نرم‌شدنی در ناحیه جوش در فلزات عملیات حرارتی پذیر که در حالت  $T_6$  عملیات حرارتی شدند انتظار می‌رود. همچنین مقداری درشت شدن دانه و نرم‌شدنی در ناحیه متأثر از حرارت نیز به وجود می‌آید. از آنجا که ناحیه متأثر از حرارت فلز پایه را به ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی و ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی نیز ناحیه متأثر از حرارت را به ناگت متصل می‌کند لذا در نهایت توزیع سختی در مقطع اتصال بصورت W شکل خواهد شد که ناحیه متأثر از حرارت کمترین مقدار را در این بین خواهد داشت، که این نتیجه با نتیجه حاصل شده [۱۱] تطابق دارد.

#### ۴- بحث

از نتایج تجربی بدست آمده است که اتصالات تولید شده با سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور در دقیقه و سرعت جوشکاری ۶۰ میلی‌متر در دقیقه با استفاده از ابزاری با قطر شانه ۱۵ میلی‌متر، قطر پین ۵ میلی‌متر و سختی ۴۵HRC در مقایسه با سایر اتصالات استحکام کششی بالایی را نشان می‌دهد. دلیل کارکرد بهتر این اتصالات به این شرح است:

#### ۴-۲- تأثیر سرعت جوشکاری

شكل ۵ و جدول ۷ تأثیر سرعت جوشکاری روی خواص

می‌دهد و این یکی از دلایل برای خواص مکانیکی بالای این اتصالات است.

#### ۳-۴- تأثیر اندازه قطر شانه

قطر شانه ابزار ارتباط مستقیمی با تولید حرارت ناشی از اصطکاک دارد. گزارش شده است [۹] که در بخش بالای منطقه اغتشاش، جایجایی مواد به خاطر شانه ابزار چرخشی اتفاق می‌افتد. مواد نزدیک بخش بالای منطقه اغتشاش بیشتر به خاطر شانه جایجا می‌شوند تا پروفیل پین. پین باعث ایجاد حرارت و اغتشاش و اختلاط مواد جوشکاری می‌شود ولی شانه ابزار همان طور که از فرار مواد نرم شده جلوگیری می‌کند با تولید حرارت اصطکاکی اضافی نقش مهمتری ایفا می‌کند. اصطکاک بین شانه و قطعه کار بخش بزرگی از حرارت را نتیجه می‌دهد. از جنبه حرارتی، قطر شانه مناسب با قطر پین، بسیار مهم است. قطر شانه همچنین برای حجمی از مواد حرارت دیده یک قید و حصار فراهم می‌کند. دومین کاربرد شانه، اختلاط و حرکت دادن فلز است. نیروی فرایند به همان اندازه یکنواختی ریز ساختار و خواص، توسط طراحی ابزار کنترل می‌شود [۹]. شکل ۶ تأثیر قطر شانه را روی خواص مکانیکی اتصالات آلیاز آلومینیوم ۷۰۷۵ نشان می‌دهد. از شکل ۶ و جدول ۸ نتایج زیر بدست می‌آید:

(۱) قطر شانه بزرگتر منطقه بزرگتر تماس را ایجاد می‌کند که باعث گستردگی تر شدن منطقه متأثر از حرارت-کار مکانیکی و منطقه متأثر از حرارت می‌شود. در نتیجه خواص مکانیکی اتصالات کاهش می‌یابد.

(۲) قطر شانه کوچکتر منطقه تماس کوچکتر را ایجاد می‌کند که باعث می‌شود حرارت اصطکاکی کمتری تولید شود. بنابراین اتصال و ادغام فلز در منطقه اغتشاش مناسب نبوده، در نتیجه باعث خواص مکانیکی پایین می‌شود.

(۳) از ۴ اتصال تولید شده با قطر شانه متفاوت، اتصالات تولید شده با قطر شانه ۱۵ میلی‌متر منجر به حصول بهترین خواص مکانیکی گردید.

قطر شانه بزرگتر، منطقه تماس گسترده‌تری را ایجاد می‌کند که باعث می‌شود مناطق متأثر از حرارت-کار مکانیکی و متأثر از حرارت گستردگی شود و نتیجتاً خواص مکانیکی اتصالات کاهش یابد. وقتی قطر شانه از ۹ به ۱۵ میلی‌متر افزایش پیدا

مکانیکی و ساختار ماکرو اتصالات جوشکاری آلومینیوم ۷۰۷۵ را نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده را به صورت زیر می‌توان دسته‌بندی کرد:

(۱) اتصالات تولید شده در سرعت جوشکاری ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر در دقیقه در مقایسه با اتصالات تولید شده در سرعت جوشکاری ۶۰ میلی‌متر در دقیقه خواص مکانیکی پایین‌تری دارند.

(۲) اتصالات تولید شده در سرعت جوشکاری ۸۰ میلی‌متر در دقیقه در مقایسه با سرعت جوشکاری ۶۰ میلی‌متر در دقیقه استحکام کششی پایین‌تری را از خود نشان می‌دهند.

در سرعت جوشکاری بالا منطقه نرم شده (پلاستیکی) در مقایسه با سرعت جوشکاری پایین باریک‌تر است. بنابراین استحکام کششی آلیاز آلومینیوم جوشکاری شده به صورت نسبی در ارتباط با سرعت جوشکاری است. سرعت جوشکاری بالا متناسب با حرارت ورودی پایین است که باعث خنک شدن سریع‌تر اتصالات تولید شده می‌شود. زمانی که سرعت جوشکاری افزایش می‌یابد عرض منطقه اغتشاش و همچنین ماکزیمم کرنش کاهش می‌یابد و منطقه مربوط به ماکزیمم کرنش به تدریج از قسمت پیش رو به قسمت پس رو جابجا می‌شود. در سرعت جوشکاری بالا، حرارت ورودی کم ممکن است باعث کمیود اتصال شود و تشکیل عیوب در قسمت پیش رو باعث افت خواص مکانیکی شود [۱۴]. زمانی که سرعت جوشکاری از ۲۰ به ۶۰ میلی‌متر در دقیقه افزایش می‌یابد، هم خواص مکانیکی و هم راندمان اتصالات به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد و سپس با افزایش بیشتر سرعت، کاهش می‌یابد. سرعت جوشکاری پایین، باعث ایجاد حرارت بالا و کاهش سرعت سرد شدن می‌شود که این خود منجر به رشد دانه‌ها و خوشبندی رسوبات  $MgZn_2$  در منطقه اغتشاش می‌شود که در نهایت سختی کمتری را در منطقه اغتشاش نتیجه میدهد. بنابراین تأثیر مجموع رشد دانه‌ها، سختی کمتر و ظهور عیوب، خواص استحکام کششی اتصالات تولید شده با سرعت جوشکاری ۲۰ میلی‌متر در دقیقه را در مقایسه با اتصالات تولید شده با سرعت ۶ میلی‌متر در دقیقه به صورت نامطلوبی تحت تأثیر قرار داده و کاهش می‌دهد. اتصالات تولید شده با سرعت ۶ میلی‌متر در دقیقه دانه‌بندی بهتر با توزیع یکنواخت حفره‌ها را با سختی ۱۹۸ ویکرز در منطقه جوشکاری بدست

می شود که عیوبی را در قسمت پیش رو در منطقه متأثر از حرارت-کار مکانیکی، رشد دانه و خوشبندی نامناسب رسوبات در منطقه اغتشاش ایجاد می کند که سختی پایین را نتیجه می دهد [۱۵]. سیر شکست حفره های رشد کرده و افزایش طول پیدا کرده نیز به همین دلیل بالاست. بنابراین مجموع آثار رشد دانه ها، سختی پایین و ظهور عیوب باعث کاهش استحکام کششی اتصالات تولید شده با قطر پین ۳ میلی متر در مقایسه با اتصالات تولید شده با قطر پین ۵ میلی متر می شود.

#### ۴-۵- تأثیر سختی ابزار

در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی سختی ابزار تعیین کننده ضریب اصطکاک است. اگر ضریب اصطکاک زیاد باشد اصطکاک بین ابزار و فلز پایه بیشتر شده در نتیجه حرارت تولیدی بالا خواهد رفت. اگر ضریب اصطکاک کم باشد اصطکاک کم بوده و حرارت تولیدی نیز کم خواهد بود. بنابراین ضریب اصطکاک یا به عبارت دیگر سختی ابزار کنترل کننده حرارت تولیدی است. سختی ابزار پایین حرارت کمی تولید می کند که نتیجتاً حرارت اعمال شده به فلز پایه کمتر خواهد بود، و این امر باعث کاهش خواص مکانیکی اتصالات می گردد. اگر سختی ابزار زیاد باشد حرارت تولیدی و اعمال شده به فلز پایه بیشتر خواهد بود و باز هم باعث کاهش خواص مکانیکی می شود. حرارت ورودی بالا باعث ایجاد عیوب در قسمت پس رو در منطقه متأثر از حرارت-کار مکانیکی و رشد دانه و خوشبندی نامناسب رسوبات در منطقه اغتشاش می شود که نهایتاً سختی پایین را در منطقه اغتشاش باعث می شود. بنابراین مجموع آثار رشد دانه، سختی پایین و ظهور عیوب خواص استحکام اتصالات تولید شده با ابزاری با سختی  $HRC_50$  را در مقایسه با اتصالات تولید شده با سختی ابزار  $HRC_{45}$  کاهش می دهد. اتصالات تولید شده با سختی ابزار  $HRC_{45}$  دانه بندی بهتر با توزیع یکنواخت حفره ها و سختی  $HRC_{45}$  ویکرزا را در منطقه اغتشاش فراهم می کند و این یکی از دلایل استحکام بالای این اتصالات است. که این امر در شکل ۸ و جدول ۱۰ نشان داده شده است.

#### ۵- نتیجه گیری

۱) اتصالات تولید شده با پارامترهای جوش کاری  $1400$  دور در دقیقه سرعت دورانی،  $60$  میلی متر در دقیقه سرعت جوش کاری

می کند هم خواص مکانیکی و هم راندمان اتصالات به مقدار ماکریزم خود قبل از کاهش دوباره در قطر شانه بزرگتر می رسد. قطر شانه کوچک تر باعث تولید حرارت ناکافی به علت منطقه تماس کوچک تر می شود که باعث ایجاد عیوب در منطقه اغتشاش می شود و همچنین باعث رشد دانه ها و خوشبندی خشن و نامناسب رسوبات در منطقه اغتشاش می شود که نهایتاً سختی پایین را در منطقه اغتشاش نتیجه می دهد. بنابراین مجموع آثار رشد دانه ها، سختی پایین و ظهور عیوب باعث کاهش خواص مکانیکی اتصالات تولید شده با ابزاری با قطر شانه  $18$  میلی متر در مقایسه با اتصالات تولید شده با ابزاری به قطر شانه  $15$  میلی متر می شود. اتصالات تولید شده با قطر شانه  $15$  میلی متر دانه بندی بهتری با توزیع یکنواخت حفره ها و سختی  $198$  ویکرزا را در منطقه اغتشاش ایجاد می کند و این یکی از دلایل برای استحکام بالای این اتصالات است.

#### ۴-۶- تأثیر قطر پین

شکل ۷ و جدول ۹ تأثیر قطر پین ابزار را روی خواص مکانیکی و ساختار ماکرو اتصالات جوش کاری شده را نشان میدهد.

اتصالات تولید شده با قطر پین  $3$  و  $4$  میلی متر خواص استحکام کششی، تسلیم و سختی منطقه اغتشاش و راندمان پایین تری را در مقایسه با اتصالات تولید شده با قطر پین  $5$  میلی متر نشان می دهند. از طرفی افزایش قطر به بیشتر از  $5$  میلی متر نیز باعث کاهش خواص مکانیکی اتصال شده است.

در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی قطر پین تعیین کننده مقداری از فلز است که پلاستیکی شده و اختلاط می یابد. اگر قطر پین بزرگ باشد مقدار مواد اغتشاش یافته بیشتر می شود و بر عکس. قطر پین کوچک باعث می شود حرارت بالایی به حجم کوچکی از فلز برسد که این باعث ایجاد جریان متلاطمی از مواد و رشد دانه می شود. همچنین باعث جریان نامناسب و ناکافی مواد می گردد. هردوی این شرایط باعث کاهش خواص مکانیکی می شوند. اتصالات تولید شده با قطر پین  $3$  و  $4$  میلی متر، تولید حرارت بالا می کنند که خواص مکانیکی را کاهش می دهد. وقتی قطر پین از  $3$  به  $5$  میلی متر افزایش پیدا می کند، هم خواص مکانیکی و هم راندمان اتصالات به مقدار ماکریزم خود قبل از کاهش دوباره در قطر پین بالاتر، می رسد. قطر پین بزرگتر باعث تولید حرارت نامناسب به خاطر منطقه تماس بالا

- [6] John R, Jata KV, Sadananda K. "Residual stress effects on near-threshold fatigue crack growth in friction stir welds in aerospace alloys", *Int J Fatigue* Vol. 25, 2003, pp. 939–48.
- [7] Jata KV, Sankaran KK, Ruschau J. "Friction stir welding effects on microstructure and fatigue of aluminum alloy 7050-T7451", *Metall Mater Trans A*, Vol. 31, No. 9, 2000, 2181–92.
- [8] Hatamleh Omar, Singh Preet M, Garmestani Hamid. "Corrosion susceptibility of peened friction stir welded 7075 aluminum alloy joints", *Correct Sci* Vol. 51, 2009, pp. 135–43.
- [9] Cai M, Huang D, Adams BL, Nelson TW. "Microstructure characteristics of friction stir processes Al 7075 via macroscopic app. roach", *Frict Stir Weld Proc III TMS* 2005, pp. 269–75.
- [10] ASTM E8 M-04. "Standard test method for tension testing of metallic materials", *ASTM International*, 2006.
- [11] A. J. Leonard, "Proc. 2nd Int. Symp. on 'Friction stir welding'" in *TWI*, Gothenburg, Sweden, June 2000.
- [12] Olga VF. "Microstructural issues in a friction-stir-welded aluminum alloy", *Scripta Mater*, Vol. 38, No. 5, 1998, pp. 703–8.
- [13] N. Rajamanickam, V. Balusamy, G. Madhusudhan Reddy, K. Natarajan, "Effect of process parameters on thermal history and mechanical properties of friction stir weld", *Materials and Design*, Vol. 30, 2009, pp. 2726–2731.
- [14] K. Y. Hua-Bin Chen, "The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds", *Materials Science and Engineering*, Vol. A433, 2006, pp. 64–69.
- [15] R. Rai, H. Bhadeshia and T. DebRoy, "Review: friction stir welding tools", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 16, No. 4, 2011, p. 325.

و با پارامترهای ابزار ۱۵ میلی‌متر قطر شانه، ۵ میلی‌متر قطر پین و سختی ابزار ۴۵HRC در مقایسه با سایرین خواص مکانیکی بهتری را حاصل می‌کند.  
 ۲) در این تحقیق با استفاده از پارامترهای مناسب، استحکام کششی ۳۱۵ مگاپاسکال، استحکام تسلیم ۳۷۳ مگاپاسکال، سختی ۲۰۳ ویکرز و راندمان ۷۷ درصد در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ بدست آمد.  
 ۳) ریز ساختاری بدون عیب با دانه‌بندی بهتر و توزیع یکنواخت رسوبات MgZn<sub>2</sub> در منطقه اغتشاش به عنوان عوامل مؤثر در خواص مکانیکی بالای اتصالات شناخته شده می‌شود.

## ۶- مراجع

- [1] Jha Abhay K, Sreekumar K. "Metallurgical studies on cracked Al-5.5Zn-2.5Mg-1.5Cu aluminum alloy injector disc of turbine rotor", *J. Fail Anal Prev* Vol. 8, No. 4, 2008, pp. 327–32.
- [2] Balasubramanian V, Ravisankar V., Madhusudhan Reddy G. "Effect of post weld aging treatment on fatigue behavior of pulsed current welded AA7075 aluminum alloy joints", *J Mater Eng Perform* Vol. 7, No. 2, 2008, pp. 224–33.
- [3] Gupta RK, Ramkumar P, Ghosh BR. "Investigation of internal cracks in aluminum alloy AA7075 forging", *Eng Fail Anal*, Vol. 13, 2006, pp. 1–8.
- [4] Soundarajan Vijay, Zekovic Srdja, Kovacevic Radovan. "Thermo-mechanical model with adaptive boundary conditions for friction stir welding of Al 6061", *Int J Mach Tools Manuf*, Vol. 45, pp. 1577–87.
- [5] Bussu G, Irving PE. "The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351 aluminium joints", *Int J Fatigue* Vol. 25, 2003, pp. 77–88.