Archive of SID

مجله مهندسی مکانیک، شماره پیاپی ۸۷، جلد ۴۹، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۳۴۹-۳۵۳

# بررسی اثر آفست ابزار بر خواص مکانیکی اتصال حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی قطعات با ضخامت‌های ناهمسان آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-T۶

**داریوش جواب‌ور*** استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

**علی زهره‌وند** دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

**چکیده**

پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از قبیل سرعت دورانی، سرعت پیشروی، آفست محوری ابزار و عمق نفوذ ابزار نقش اصلی را در ویژگی‌های این اتصال دارند. در این تحقیق اثر آفست محوری پین ابزار و عمق نفوذ شانه ابزار بر کیفیت و خواص مکانیکی اتصال حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دو آلیاژ هم‌جنس آلومینیوم ۶۰۶۱-T۶ با ضخامت‌های ناهمسان ۲ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر و ۲ میلی‌متر به ۶ میلی‌متر مورد مطالعه قرار گرفت. با تغییر آفست محوری پین ابزار استحکام‌های کششی مختلفی به‌دست آمد. با آفست‌دهی ابزار در داخل ورق ضخیم‌تر ذرات بزرگ ناپیوسته در ناحیه اغتشاش مشاهده شد که سبب ایجاد ترک‌هایی در سطح جوش گردید که سبب افت کیفیت سطح و خواص مکانیکی اتصال می‌گردد. بهترین کیفیت سطح و خواص مکانیکی با آفست‌دهی ابزار در داخل ورق نازک‌تر به دست آمد. عمق نفوذ شانه ابزار عامل مهمی در تولید گرما، اکستروژن مواد در زیر شانه و جریان مواد در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌باشد. در عمق نفوذ کم شانه خواص مکانیکی ضعیف‌تری مشاهده شد که می‌تواند به دلیل عدم تولید حرارت و جریان مواد کافی در این حالت باشد.

**واژه‌های کلیدی:** جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، آلیاژ آلومینیوم، خواص مکانیکی، آفست محوری.

# Investigation of the Effect of Tool Offset on the Mechanical Properties of Joint Resulted from Friction Stir Welding of Dissimilar Thickness Parts of 6061-T6 Al Alloy

**D. Javabvar** Department of Aerospace Engineering, Shaheed Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran

**A. Zohrehvand** Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

**Abstract**

Friction stir welding parameters such as is rotational speed, traverse speed and axial tool offset play as the main roles in achieving joint properties. In this research the effect of axial tool offset and depth of tool shoulder on the quality and mechanical properties of joint resulted from friction stir welding of 2 mm thickness to 4 mm thickness and 2mm thickness to 6 mm thickness of 6061-T6 Al alloy was investigated. It was shown that tensile strength of joints differs by varying the axial tool offset. When tool offsets there are in the thicker part, large discontinues particles could be observed in the stir zone which caused some cracks at the weld surface and therefore reduced surface quality and mechanical properties of joint. The best surface quality and mechanical properties were resulted from the tool offsetting in thinner part. The depth of tool shoulder is an important factor in heat generation, material extrusion under the shoulder and material flow during friction stir welding. At lower depth of shoulder weaker mechanical properties were observed which may be resulted from lack of sufficient heat generation and material flow at this situation.

**Keywords:** Friction Stir Welding, Aluminum Alloys, Mechanical Properties, Axis Offset.

## ۱- مقدمه

در سال ۱۹۹۱ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی[۱] برای اولین بار در صنعت مورد استفاده قرار گرفت. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک روش حالت جامد است که بیشتر برای آلیاژهای آلومینیوم کاربرد دارد. در میان آلیاژهای آلومینیوم، آلیاژ ۶۰۶۱-T۶ به‌صورت گسترده در صنعت استفاده می‌شود [۲،۱]. در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ابزار چرخنده‌ای که شامل شانه و پین می‌باشد در سطح مشترک دو فلز پایه با یک زاویه انحراف قرار می‌گیرد و تا درگیر شدن سطح شانه با سطح فلز، در ماده پایه نفوذ می‌کند و سپس همراه با دو حرکت چرخشی و پیشروی در راستای خط اتصال پیش می‌رود[۲]. مطالعات زیادی در زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ انجام شده است. در سال ۲۰۱۰، راجکومار و همکارانش روابط تجربی برای پیش‌بینی اندازه دانه‌ها و استحکام کششی قطعات در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-T۶ پیشنهاد دادند[۳]. در سال ۲۰۱۴، فدائی‌فرد و همکارانش اثر سرعت دورانی ابزار را بر خواص مکانیکی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لب به لب آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-T۶ مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که با افزایش سرعت دورانی ساختار ناحیه مرکزی جوش ریزدانه‌تر شده و باعث افزایش سختی در ناحیه مرکزی جوش نسبت به ناحیه متأثر از حرارت می‌شود [۴]. در سال ۲۰۱۵، لوئیس‌ترایبا و همکارانش اثر ویژگی‌های شانه ابزار بر عیوب و خواص کششی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم۶۰۶۱-T۶ مورد مطالعه قراردادند و به این نتیجه رسیدند که سطح شانه ابزار تأثیر چشم‌گیری بر کیفیت سطح اتصال دارد [۵]. در سال ۲۰۱۵، داوود و همکارانش اثر پروفیل پین ابزار جوشکاری

[۱] Friction Stir Welding (FSW)

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: javabvar@ssau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۲/۲۹
تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۱/۲۰

www.SID.ir

Archive of SID



اصطکاکی اغتشاشی را بر ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ ۶۰۶۱-T۶ مورد بررسی قراردادند [۶]. در سال ۲۰۱۶، غروی فرهاد و همکارانش به ارزیابی خوردگی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لب به لب آلیاژ ۶۰۶۱-T۶ پرداختند [۷]. در سال ۲۰۱۶، سرگئی مالفیو و همکارانش بهینه‌سازی فرایند، ساختار و خواص جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-T۶ را مورد مطالعه قراردادند و به این نتیجه رسیدند که عملیات حرارتی بعد از جوشکاری آلیاژ آلومینیوم T۶ باعث بهبود کامل استحکام جوش می‌گردد و به‌طور چشم‌گیری شکل‌پذیری جوش را بهبود می‌بخشد، اما منجر به رشد دانه‌ها به‌صورت غیرطبیعی در ناحیه اغتشاش می‌شود[۸].

در این تحقیق، به بررسی امکان اتصال ورق‌هایی با ضخامت‌های متفاوت ۲ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر و ۲ میلی‌متر به ۶ میلی‌متر با جنس مشابه آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-T۶ با فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداخته شده است.

## ۲- آزمایش‌های تجربی

در میان آلیاژهای آلومینیوم، آلیاژ ۶۰۶۱-T۶ به‌صورت گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد، ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-T۶ به‌ترتیب در جداول ۱ و۲ آورده شده است. ابعاد ورق‌های آلومینیومی ۶۰۶۱-T۶ به‌کار رفته، به‌عنوان قطعه‌کار در این تحقیق، ۲×۵۰×۱۰۰، ۴×۵۰×۱۰۰و ۶×۵۰×۱۰۰ میلی‌متر است. ضخامت‌ها با نسبت‌های ۲ و ۳ برابر تهیه گردید تا از نتایج به‌دست آمده در اتصالات با ضخامت‌های ناهمسان استفاده شود. تمامی نمونه‌ها با وایرکات برش داده شده و هیچ‌گونه عملیات حرارتی بر روی ورق‌ها انجام نگرفته است.

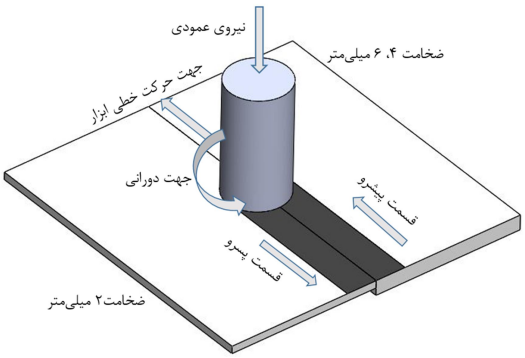
**جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ۶۰۶۱-T۶**

| Al | Mg | Mn | Zn | Fe | Cu | Si | Cr | Ti |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| پایه | ۰/۸۴ | ۰/۰۱ | ۰/۰۶ | ۰/۴ | ۰/۲۴ | ۰/۵۴ | ۰/۱۸ | ۰/۰۵ |

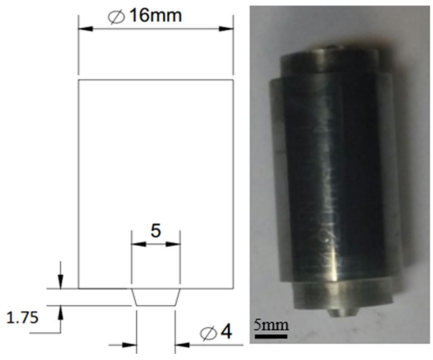
**جدول ۲- خواص مکانیکی آلیاژ۶۰۶۱-T۶**

| سختی (HV) | تغییر طول (%) | استحکام‌کششی (MPa) | تنش تسلیم (MPa) |
|---|---|---|---|
| ۹۸ | ۱۵ | ۳۰۰ | ۲۷۰ |

در این تحقیق، در یک حالت ورق آلومینیومی ۲ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر جوش داده شد که ضخامت بیشتر ۴ میلی‌متر در قسمت پیشرو و ورق آلومینیومی با ضخامت کمتر ۲ میلی‌متر در قسمت پسرو قرار گرفت؛ در حالت دیگر ورق آلومینیومی با ضخامت ۲ میلی‌متر به ۶ میلی‌متر جوش داده شد که در این حالت نیز ضخامت بیشتر ۶ میلی‌متر در قسمت پیشرو و ضخامت کمتر ۲ میلی‌متر در قسمت پسرو قرار گرفت. طرحواره فرایند در شکل ۱ آورده شده است.




**شکل ۱- طرحواره فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی**




**شکل ۲- مشخصات هندسی و ابزار استفاده شده در تحقیق**

در این تحقیق ابزار از جنس فولاد H۱۳ که نوعی فولاد گرم‌کار می‌باشد، استفاده گردید. عملیات سخت کردن ابزار مطابق با استاندارد ASTM انجام و نسبت به محور عمودی با زاویه ۲ درجه موقعیت‌دهی شد. مشخصات هندسی و ابزار به‌کار رفته در شکل ۲ نشان داده شده است.

در این تحقیق، در اتصال نمونه ۲ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر و ۲ میلی‌متر به ۶ میلی‌متر از سرعت دورانی ۹۰۰rpm و سرعت پیشروی ۴۰mm/min به منظور یافتن آفست بهینه استفاده شد. پس از دست‌یابی به آفست(انحراف مرکز پین ابزار از درز اتصال) بهینه، از آفست بهینه و سرعت‌های مذکور برای تعیین تأثیر عمق نفوذ شانه ۰/۱۵ میلی‌متر و ۰/۲۵ میلی‌متر بر استحکام استفاده گردید.

نمونه‌ها برای انجام آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM E8 آماده سازی شدند، سرعت انجام آزمون کشش برای همه نمونه‌ها ۱mm/min می‌باشد. برای هرکدام از آفست‌ها دو نمونه تست کشش توسط دستگاه وایرکات بریده شد و نتایج میانگین دو نمونه در این پژوهش گزارش شد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- کیفیت ظاهری جوش

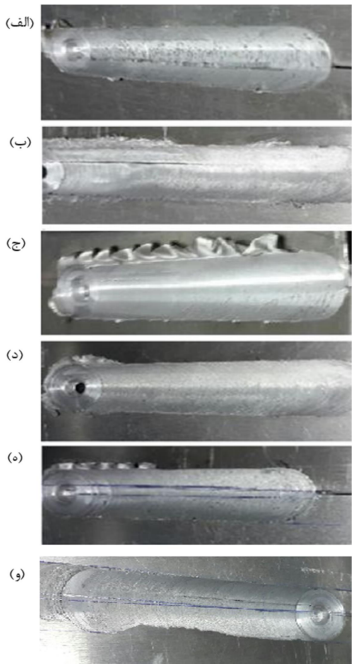
کیفیت ظاهر جوش حاصل از اتصال ضخامت ۲ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر در سرعت دورانی ۹۰۰rpm، سرعت پیشروی ۴۰mm/min و عمق نفوذ شانه ۰/۱۵ میلی‌متر در شکل ۳ مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۳ (الف) مربوط به آفست ۰/۳ میلی‌متر در ورق ضخیم‌تر ذرات بزرگ پیوسته در ناحیه اغتشاش و در شکل ۳ (ب) مربوط به آفست


www.SID.ir

Archive of SID



صفر ترک در سطح جوش مشاهده می‌شود. هردو این عیوب می‌توانند ناشی از عدم اختلاط کافی به دلیل اختلاف در گرمای فروکش[1] دو ورق باشد به گونه‌ای که ورق ضخیم‌تر به دلیل گرمای فروکش بیشتر، نسبت به ورق نازک‌تر به میزان کمتری به حالت خمیری لازم جهت اختلاط کافی با فلز نازک‌تر می‌رسد و در برخی نقاط از ورق ضخیم‌تر ذرات جامدی کنده و در ناحیه اغتشاش محصور می‌گردد و به‌دلیل تمرکز تنش می‌تواند محل مناسبی برای جوانه زنی ترک‌ها باشد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، این عیوب با آفست‌دهی در داخل ورق نازک‌تر کاهش می‌یابد و یا حذف می‌گردد. در شکل ۳ (ج) مربوط به آفست ۰/۳ میلی‌متر در ورق نازک‌تر ذرات بزرگ پیوسته در ناحیه اغتشاش کم شده و سطح کیفیت بهتری دارد. با افزایش آفست به ۰/۵ میلی‌متر در ورق نازک‌تر شکل ۳ (د) منجر به ظاهر سطح عالی و ادغام مواد مطلوب گردیده و هیچ‌گونه ترک و ناپیوستگی در سطح جوش وجود ندارد که موجب افزایش استحکام اتصال شده است. در شکل ۳ (ه) مربوط به آفست ۰/۶۵ میلی‌متر در ورق نازک‌تر نیز هیچ‌گونه ترک در ناحیه اغتشاش مشاهده نمی‌شود و سطح دارای کیفیت خوبی است. شکل ۳ (و) در آفست ۰/۸۵ میلی‌متر در ورق نازک‌تر دو ماده خوب ادغام نشده و سطح دارای کیفیت مناسبی نمی‌باشد. در اتصال نمونه ۲ میلی‌متر به ۶ میلی‌متر با پارامترهای مذکور در حالت قبل بهترین کیفیت ظاهری سطح جوش باز هم با آفست‌دهی در ورق نازک‌تر البته با مقداری متفاوت از حالت قبل(۰/۶۵ میلی‌متر) به‌دست آمد.

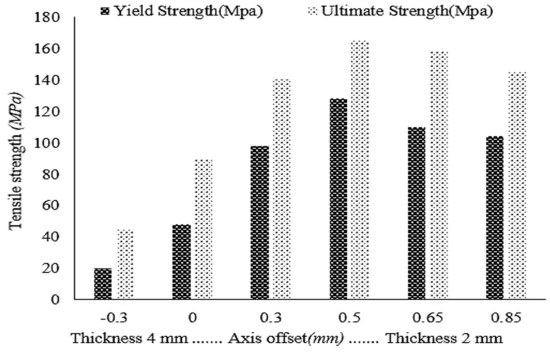



**شکل ۳- کیفیت ظاهری سطح جوش: الف)آفست ۰/۳ میلی‌متر در ورق ضخیم‌تر ب) آفست صفر ج) آفست ۰/۳ میلی‌متر در ورق نازک‌تر د) آفست ۰/۵ میلی‌متر در ورق نازک‌تر ه) آفست ۰/۶۵ میلی‌متر در ورق نازک‌تر و) آفست ۰/۸۵ میلی‌متر در ورق نازک‌تر**

[1] Heat Sink

## ۳-۲- اثر آفست محوری ابزار بر استحکام کششی

میزان آفست اعمالی ابزار نسبت به فصل مشترک دو قطعه یکی از عوامل مؤثر بر خواص مکانیکی و نحوه سیلان مواد در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌باشد. در سال ۲۰۰۷ لانگ و همکارانش [۹] به این نتیجه رسیدند که میزان کرنش در سمت پیشرو بیشتر از سمت پسرو می‌باشد. در نتیجه اگر محور ابزار به سمت پسرو (ورق نازک‌تر) انتقال داده شود، شاهد مخلوط شدن بهتر دو ماده خواهیم بود. علاوه بر این به‌دلیل گرمای فروکش کمتر ورق نازک‌تر نسبت به ورق ضخیم‌تر، آفست‌دهی ابزار در ورق نازک‌تر باعث افزایش دمای بیشتر و در نتیجه اختلاط بهتر مواد می‌گردد که منجر به افزایش استحکام اتصال گردیده است. همچنین در مطالعات انجام شده برای اتصال مواد غیر هم‌جنس با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در آفست صفر، کیفیت ضعیف اتصال گزارش شده است که معمولاً به‌دلیل وجود عیوب و ترک‌ها در اتصال می‌باشد [۱۰]. در آفست ۰/۳ میلی‌متر در ورق ضخیم‌تر و آفست صفر به دلیل وجود عیوبی همچون ترک، حفره، عدم مخلوط شدگی و یکنواختی دارای استحکام کششی پایینی است. در شکل ۴ نتایج حاصل از آزمون کشش برای اتصال نمونه‌های ۲ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر و عمق نفوذ ۰/۱۵ میلی‌متر در آفست‌های مختلف نشان داده شده است. در این حالت بیش‌ترین استحکام کششی به مقدار ۱۶۵ MPa، ۵۵ درصد فلز پایه در آفست ۰/۵ میلی‌متر در ورق نازک‌تر به دست آمد. نتایج حاصل از کشش برای نمونه‌های ۲ میلی‌متر به ۶ میلی‌متر و عمق نفوذ ۰/۱۵ میلی‌متر در آفست‌های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. در این حالت بیش‌ترین مقدار استحکام کششی به مقدار ۱۶۰ MPa، ۵۳ درصد فلز پایه در آفست ۰/۶۵ میلی‌متر به سمت ورق نازک‌تر به دست آمد.



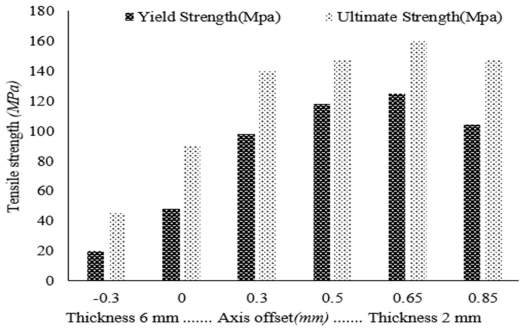

**شکل ۴- تأثیر آفست پین بر استحکام کششی برای اتصال ورق با ضخامت ۲ میلی‌متر به ورق با ضخامت ۴ میلی‌متر با عمق نفوذ شانه ۰/۱۵ میلی‌متر**



www.SID.ir

Archive of SID

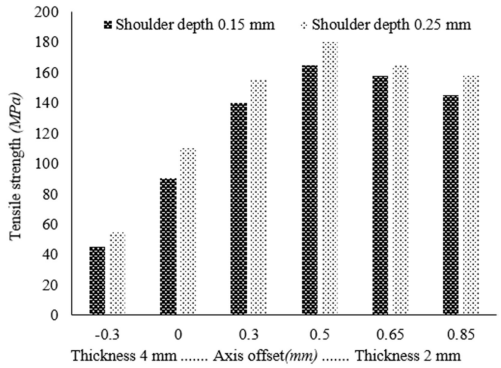




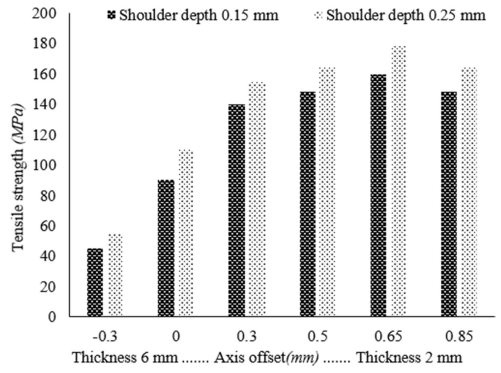

**شکل ۵- تأثیر آفست پین بر استحکام کششی برای اتصال ورق با ضخامت ۲ میلی‌متر به ورق با ضخامت ۶ میلی‌متر با عمق نفوذ شانه ۰/۱۵ میلی‌متر**

## ۳-۳- اثر عمق نفوذ ابزار بر استحکام کششی

منظور از عمق نفوذ ابزار مقدار فرورفتگی شانه ابزار در سطح اتصال است، مقدار نفوذ ابزار بر روی کیفیت سطح اتصال، جریان مذاب در زیر شانه و نیز محل نفوذ و خروج ابزار تأثیر مستقیم دارد. با افزایش مقدار نفوذ ابزار، فشار جوشکاری نیز بیشتر می‌شود[۱۱]. افزایش فشار جوشکاری سبب بیشتر شدن تعامل قسمت‌های مختلف ابزار با قطعه کار خواهد شد که نتیجه آن تولید بیشتر گرمای اصطکاکی و تغییر شکل پلاستیک شدید مواد در اطراف ابزار است[۱۲]. عمق نفوذ ابزار نقش اساسی در تولید گرما، اکستروژن مواد در زیر ابزار و جریان مواد در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دارد، در نتیجه بر روی خواص مکانیکی اتصال اثر می‌گذارد [۱۳]. اگر عمق نفوذ از حدی کمتر باشد قسمت ریشه به خوبی پرنشده و در نتیجه عیوبی نظیر خالی ماندن ریشه جوش در اتصال شکل می‌گیرد، علاوه بر این ممکن است دمای فرآیند به حد کافی نرسد چرا که سطح تماس شانه ابزار کاهش می‌یابد و در نتیجه سبب ایجاد عیوب مکانیکی در جوش می‌گردد، در نتیجه استحکام اتصال کاهش می‌یابد. در این تحقیق، عمق نفوذ ۰/۱۵ میلی‌متر و ۰/۲۵ میلی‌متر در سرعت دورانی ۹۰۰rpm و سرعت پیشروی ۴۰mm/min در آفست بهینه ۰/۵ میلی‌متر برای اتصال نمونه‌های ۲ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر و آفست بهینه ۰/۶۵ میلی‌متر برای اتصال نمونه‌های ۲ میلی‌متر به ۶ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۶ برای نمونه‌های ۲ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر در آفست ۰/۵ میلی‌متر نشان داده شده است که با افزایش عمق نفوذ ابزار از ۰/۱۵ میلی‌متر به ۰/۲۵ میلی‌متر مقدار استحکام کششی از ۱۶۵ MPa به ۱۸۰ MPa افزایش پیدا کرد و مقدار استحکام کششی نمونه نسبت به فلز پایه از ۵۵ درصد به ۶۰ درصد رسید. در شکل ۷ برای نمونه‌های ۲ میلی‌متر به ۶ میلی‌متر در آفست ۰/۶۵ میلی‌متر نشان داده شده است که با افزایش عمق نفوذ ابزار از ۰/۱۵ میلی‌متر به ۰/۲۵ میلی‌متر مقدار استحکام کششی از۱۶۰ MPa به ۱۷۸ MPa افزایش پیدا کرد و مقدار استحکام کششی نمونه نسبت به فلز پایه از ۵۳ درصد به ۵۹ درصد رسید.




**شکل ۶- تأثیر عمق نفوذ شانه ابزار و آفست پین بر استحکام کششی برای اتصال ورق ۲ میلی‌متر به ورق ۴ میلی‌متر**




**شکل ۷- تأثیر عمق نفوذ شانه ابزار و آفست پین بر استحکام کششی برای اتصال ورق ۲ میلی‌متر به ورق ۶ میلی‌متر**

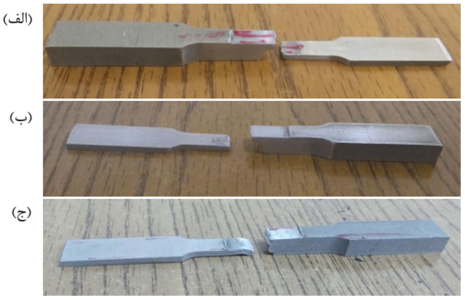
## ۴-۳- محل شکست نمونه‌های آزمون کشش

در جوش‌های معیوب بزرگ بودن عیب تمرکز تنش زیادی به دنبال خواهد داشت و در نتیجه تمرکز تنش در جوش بر عامل سختی غلبه کرده و باعث بروز شکست در منطقه عیب می‌شود [۱۴]. در نمونه‌های سالم و با حداقل عیوب، شکست از ناحیه‌ای که دارای سختی کمتری است رخ می‌دهد [۱۵،۱۶]. در شکل‌های ۸ و ۹ نمونه‌هایی با محل شکست متفاوت آورده شد، علیرغم تغییر زیاد سطح مقطع در اتصال نمونه‌های با ضخامت مختلف و در نتیجه بروز تمرکز تنش که انتظار می‌رفت شکست در محل تغییر سطح مقطع رخ دهد ولی دادن آفست به ابزار در قطعه نازک‌تر منجر به رخ‌دادن شکست در مجاورت قطعه نازک‌تر شده است. شکل‌های ۸(الف)، (ب)، (ج) و (د) مربوط به اتصال نمونه‌های با ضخامت ۲ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر به ترتیب با آفست‌های ۰/۶۵، ۰/۵، ۰/۳ و صفر میلی‌متر در ورق نازک‌تر است. شکست در سه نمونه اول که دارای آفست در ورق نازک‌تر هستند در ورق نازک‌تر و در نمونه بدون آفست چهارم در محل تمرکز تنش مجاور تغییر ضخامت رخ داده است. شکل‌های ۹(الف)، (ب) و (ج) مربوط به اتصال نمونه‌های ۲ میلی‌متر به ۶ میلی‌متر به ترتیب با آفست‌های ۰/۶۵، ۰/۵ و صفر میلی‌متر در ورق نازک‌تر است. شکست در دو نمونه اول که دارای آفست در ورق نازک‌ترند در ورق نازک‌تر و در نمونه بدون آفست سوم در محل تمرکز تنش مجاور تغییر ضخامت رخ داده است.


www.SID.ir

Archive of SID

**شکل ۸- شکست در نمونه‌های ۲ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر: الف) آفست ۰/۶۵ میلی‌متر در ورق نازک‌تر ب) آفست ۰/۵ میلی‌متر در ورق نازک‌تر ج) آفست ۰/۳ میلی‌متر در ورق نازک‌تر د) آفست صفر**




**شکل ۹- شکست در نمونه‌های ۲ میلی‌متر به ۶ میلی‌متر: الف) آفست ۰/۶۵ میلی‌متر در ورق نازک‌تر ب) آفست ۰/۵ میلی‌متر در ورق نازک‌تر ج) آفست صفر**

## ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اتصال دو آلیاژ هم‌جنس آلومینیوم ۶۰۶۱-T۶ با ضخامت‌های مختلف در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد مطالعه قرار گرفت. که اهم نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

۱- با تغییر ضخامت مقدار آفست بهینه تغییر می‌کند، به گونه‌ای که در اتصال نمونه ۲ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر آفست بهینه ۰/۵ میلی‌متر و در اتصال نمونه ۲ میلی‌متر به ۶ میلی‌متر آفست بهینه ۰/۶۵ میلی‌متر به‌دست آمد.

۲- آفست ابزار نقش تعیین کننده‌ای در خواص مکانیکی دارد. بیش‌ترین استحکام کششی و بهترین کیفیت ظاهری اتصال با آفست دهی در ورق نازک‌تر حاصل می‌شود.

۳- با افزایش عمق نفوذ شانه ابزار از ۰/۱۵ میلی‌متر به ۰/۲۵ میلی‌متر استحکام کششی برای ضخامت‌های ۲ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر از ۱۶۵ MPa به ۱۸۰ MPa افزایش پیدا کرد.

۴- با افزایش عمق نفوذ شانه ابزار از ۰/۱۵ میلی‌متر به ۰/۲۵ میلی‌متر استحکام کششی برای ضخامت‌های ۲ میلی‌متر به ۶ میلی‌متر از ۱۶۰ MPa به ۱۷۸ MPa افزایش پیدا کرد.

۵- شکست در اتصالات بدون آفست در محل تغییر ضخامت رخ داد. با آفست دهی ابزار در قطعه نازک‌تر، محل شکست به ناحیه جوش در ورق نازک‌تر منتقل می‌گردد.

## ۵- مراجع


[1] Liu G., Murr L., Niou C., McClure J., and Vega F., Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 aluminum, *Scripta materialia*, Vol. 37, pp. 355-361, 1997.

[2] Mishra R. S., and Ma Z., Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering*: R: Reports, Vol. 50, pp. 1-78, 2005.

[3] Rajakumar S., Muralidharan C., and Balasubramanian V., Establishing empirical relationships to predict grain size and tensile strength of friction stir welded AA 6061-T6 aluminium alloy joints, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 20, no. 10, pp. 1863–1872, 2010.

[4] Fadaeifard F. et al., Influence of rotational speed on mechanical properties of friction stir lap welded 6061-T6 Al alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 24, no. 4, pp. 1004–1011, 2014.

[5] Trueba L., Heredia G., Rybicki D., and Johannes L. B., Effect of tool shoulder features on defects and tensile properties of friction stir welded aluminum 6061-T6, *J. Mater. Process. Technol*., Vol. 219, pp. 271–277, 2015.

[6] Dawood H. I., Mohammed K. S., Rahmat A., and Uday M. B., Effect of small tool pin profiles on microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy by friction stir welding, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 25, no. 9, pp. 2856–2865, 2015.

[7] Gharavi F., Matori K. A., Yunus R., Othman N. K., and Fadaeifard F., Corrosion evaluation of friction stir welded lap joints of AA6061-T6 aluminum alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 26, no. 3, pp. 684–696, 2016.

[8] Malopheyev S., Vysotskiy I., Kulitskiy V., Mironov S., and Kaibyshev R., Optimization of processing-microstructure-properties relationship in friction-stir welded 6061-T6 aluminum alloy, *Mater. Sci. Eng*. A, Vol. 662, pp. 136–143, 2016.

[9] Long T., Tang W., Reynolds A. P., Process response parameter relationships in aluminum alloy friction stir welds, *Science and technology of welding and joining,* Vol. 12, No. 4, pp. 311-317, 2007

[10] Ouyang J., Yarrapareddy E., and Kovacevic R., Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 172, no. 1, pp. 110–122, 2006.

[11] Elyasi M., Aghajani Derazkola H., Hossinzadeh M., Effects of friction stir welding parameters on mechanical quality of AA110 Aluminum alloy to A441 AISI steel joint, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 379-390, 2015.

[12] Schmidt H., Hattel J., and Wert J., An analytical model for the heat generation in friction stir welding, *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 1, p. 143, 2003.

[13] Khan N. Z., Siddiquee A. N., Khan Z. A., and Shihab S. K., Investigations on tunneling and kissing bond defects in FSW joints for dissimilar aluminum alloys, *J. Alloys Compd*., Vol. 648, pp. 360–367, 2015.

[14] Azizi A., Aalami Aleagha M. E., Moradi H., Investigation of thermal, mechanical and microstructural properties of 7000 series Aluminum alloys welding using friction stir welding process, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 14, pp. 148-154, 2015 (In Persian).

[15] Gallais C. et al., Multiscale analysis of the strength and ductility of AA 6056 aluminum friction stir welds, *Metall. Mater. Trans*. A, Vol. 38, no. 5, pp. 964–981, 2007.

[16] Sato Y. S. and Kokawa H., Distribution of tensile property and microstructure in friction stir weld of 6063 aluminum, *Metall. Mater. Trans.* A, Vol. 32, no. 12, pp. 3023–3031, 2001.




www.SID.ir