



## بررسی تجربی خواص مکانیکی متأثر از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای غیر همجنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-T6 به مس

داود افشاری<sup>۱\*</sup>، حسن مدرسی نیا<sup>۲</sup>، محمد کریمی ایوانکی<sup>۳</sup>، محمد مهدی انتظاریان<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: dafshari@znu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۸ شهریور ۱۴۰۲

پذیرش: ۵ دی ۱۴۰۲

#### کلیدواژگان:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای

پارامترهای جوشکاری

آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

مس

خواص مکانیکی

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (FSSW) یکی از انواع روش‌های جوشکاری حالت جامد جهت اتصال قطعات و فلزات سبک بخصوص آلیاژهای آلومینیوم و مس محسوب می‌شود. در این تحقیق تأثیر پارامترهای مهم فرآیند جوشکاری FSSW از قبیل سرعت دورانی و زمان توقف ابزار بر خواص مکانیکی و میکرو سختی سنجی اتصالات غیر همجنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به مس خالص تجاری مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر نحوه قرارگیری ورق‌ها بر خواص مکانیکی مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش سرعت دورانی ابزار از ۱۲۵۰ به ۱۶۰۰ دور در دقیقه و زمان توقف ابزار از ۵ به ۱۰ ثانیه استحکام کششی و خمشی تمامی نمونه‌های جوشکاری شده افزایش می‌یابد. همچنین در سرعت‌های دورانی کمتر از ۱۲۵۰ دور در دقیقه به دلیل کاهش تولید حرارت اصطکاکی و بالاتر از ۱۶۰۰ دور در دقیقه به دلیل تولید حرارت بالاتر از حد، کیفیت اتصالات کاهش یافته است. نتایج میکرو سختی سنجی نشان می‌دهد در پارامترهای مختلف جوشکاری با افزایش سرعت دورانی و زمان توقف ابزار باعث ایجاد دانه‌های ریز و تبلور مجدد یافته در منطقه اغتشاشی و دیگر نواحی شده، که این مسئله در اثر حرارت تولیدی ناشی از اصطکاک و تغییر فرم شدید ماده در حین جوشکاری می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در حالتی که مس بالا و آلومینیوم پایین باشد استحکام تسلیم و نهایی کشش به بیشترین مقادیر خود به ترتیب ۱۴۲ و ۱۸۸ مگاپاسکال می‌رسد.

## Experimental investigation on mechanical properties affected by dissimilar friction stir spot welding of aluminum 6061-T6 alloy to copper

Davood Afshari<sup>1\*</sup>, Hasan Modaresinia<sup>2</sup>, Moahmmd Karimi Ivanaki<sup>3</sup>, Mohammad Mahdi Entezarian<sup>2</sup>

1- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2- MSc Graduate, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

3- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

\* Corresponding Author's Email: dafshari@znu.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 19 September 2023

Accepted: 26 December 2023

#### Keywords:

Friction Stir Spot Welding

Welding Parameters

AA6061-T6

Copper

Mechanical Properties

### Abstract

Friction stir spot welding (FSSW) is one of the types of solid state welding methods for joining parts and light metals, especially aluminum and copper alloys. In this research, the effect of important parameters of the FSSW welding process, such as rotational speed and tool stop time, on the mechanical and micro-hardness properties of dissimilar connections of aluminum alloy 6061 to commercial pure copper has been investigated. Also, the effect of the placement of the sheets on the mechanical properties has been studied. The results show that by increasing the rotational speed of the tool from 1250 to 1600 rpm and the stopping time of the tool from 5 to 10 seconds, the tensile and bending strength of all welded samples increases. Also, at rotational speeds less than 1250 rpm due to the reduction of frictional heat generation, and higher than 1600 rpm due to excessive heat generation, the quality of connections has decreased. The results of micro-hardness measurement show that in various welding parameters, increasing the rotational speed and stopping time of the tool caused the creation of fine grains and recrystallization found in the stir zone and other areas, which is due to the heat produced due to friction and severe material change in shape. The obtained results show that at high aluminum and low copper, the yield strength and ultimate tensile strength reach their highest value, of 142 MPa and 188 MPa respectively.

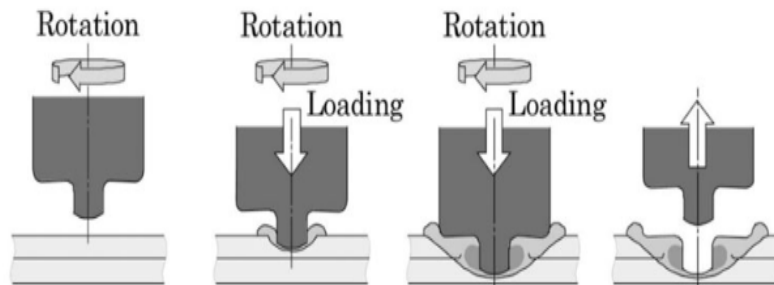
### Please cite this article using:

Afshari D, Modaresinia H, Karimi Ivanaki M, Entezarian MM. Experimental investigation on mechanical properties affected by dissimilar friction stir spot welding of aluminum 6061-T6 alloy to copper. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 August 23;10(6):53-64. doi: 10.22034/IJME.2023.413891.1824 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

امروزه مسئله کاهش وزن اجزای سازه‌ای به منظور کاهش مصرف سوخت و راندمان بالاتر یک چالش اساسی و مهم در صنایع حمل و نقل به ویژه خودروسازی و هوافضا است. مهم‌ترین و اساسی‌ترین پیشنهاد جهت کاهش وزن خودروها، جایگزین کردن قطعات سنگین فولادی با آلیاژهای سبک مانند آلومینیوم و مس است [۱]. در این میان استفاده از دو فلز غیر همجنس در کنار یکدیگر می‌تواند منجر به استفاده همزمان از مزایای هر دو فلز در کنار یکدیگر گردد. اتصال و به ویژه جوشکاری مواد غیر همجنس همواره یکی از چالش‌های بزرگ در عرصه صنعت بوده است [۲]. نیاز به استفاده از مواد با خواص مختلف در کنار هم در بسیاری از صنایع احساس می‌شود. از جمله این مواد می‌توان به دو فلز آلومینیوم و مس که فلزاتی با خواص مناسب بوده و در صنایع مختلف پر کاربرد هستند اشاره کرد. در سال ۲۰۰۱ صنعت خودروسازی روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای را با توجه به مزایای ویژه آن از جمله مصرف انرژی پایین و هزینه تجهیزات کمتر نسبت به جوشکاری مقاومتی گسترش داد [۳]. ایجاد جوش‌های با استحکام بالا و مقاوم در برابر خستگی و شکست با ریز ساختار و سختی مناسب در آلیاژهای پر کاربرد آلومینیوم، مس و منیزیم با استفاده از روش‌های جوشکاری ذوبی دشوار بوده و قابلیت استفاده از این آلیاژها را محدود کرده است [۵،۴]. پارامترهای ورودی جوشکاری مانند سرعت دورانی و زمان توقف ابزار، نیروی محوری، عمق غوطه‌وری همچنین هندسه ابزار معمولاً بر استحکام و توزیع مواد تأثیر می‌گذارد [۶]. روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای یک فرآیند اتصال جامد است که در آن یک ابزار چرخان با طراحی خاص در ابتدا به ورق بالا وارد شده، سپس در اثر چرخش ابزار و تولید گرمای اصطکاکی، مواد نرم شده و تغییر شکل پلاستیکی اتفاق افتاده و در نهایت یک اتصال جامد بین سطح ورق بالا و پایین ایجاد می‌شود [۷]. یک تصویر شماتیک از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در شکل ۱ نشان داده شده است. این فرآیند شامل چهار مرحله ۱- چرخش ابزار با سرعت دورانی بالا ۲- فرو روی ابزار، ۳- اختلاط و اغتشاش مواد و ۴- خروج ابزار است. تفاوت روش اصطکاکی اغتشاشی با روش اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در حرکت خطی ابزار است، در روش اصطکاکی اغتشاشی ابزار پس از فرو روی به سطح علاوه بر حرکت چرخشی یک حرکت خطی نیز دارد؛ اما در روش نقطه‌ای حرکت ابزار تنها محدود به حرکت چرخشی بوده و حرکت خطی ندارد [۸].



شکل ۱ شماتیک فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای [۹]

همواره بهبود خواص مکانیکی به ویژه افزایش استحکام و سختی نواحی جوشکاری از مهم‌ترین چالش‌های پژوهشگران جهت دستیابی به اتصالاتی با کمترین عیوب و بالاترین کیفیت بوده است. محققان بسیاری با در نظر گرفتن تأثیرات جداگانه هر پارامتر بر خواص مکانیکی و متالورژیکی به بررسی نتیجه کیفیت اتصال تحت اثر همزمان چند پارامتر به عنوان متغیرهای فرآیند جوشکاری FSSW پرداخته‌اند. ودیاسگر و همکاران [۱۰] اثر پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای آلیاژهای آلومینیوم غیر همجنس بر خواص مکانیکی و متالورژیکی را بررسی کرده و گزارش داده‌اند که سرعت دورانی و زمان توقف ابزار مهم‌ترین پارامتر اثرگذار بر نرخ کرنش، استحکام، ریزدانه شدن ساختار و افزایش سختی نواحی جوش است. ژانگ و همکاران [۱۱] در بررسی اثرات پارامترهای جوشکاری FSSW ترکیبی از سرعت دورانی و عمق فرو روندگی ابزار را در جوشکاری آلیاژ منیزیم AZ91 دریافتند که عمق فرو روندگی ابزار مؤثرترین پارامتر در کیفیت جوش بوده و با افزایش سرعت دورانی ابزار استحکام نمونه‌های جوش افزایش یافته است. ژانگ و همکارانش [۱۲] در جوشکاری FSSW آلومینیوم و مس دریافتند که ساختار ترکیبات بین فلزی تأثیر قابل توجهی در خواص متالورژیکی اتصالات جوش داده دارد. ترکیب بین فلزی مس و آلومینیوم به بهبود و ریزدانه شدن ساختار و افزایش سختی اتصال

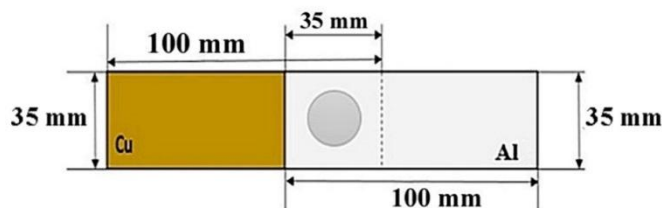
کمک می‌کند. حسین و همکارانش [۱۳] به بررسی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای آلیاژهای آلومینیوم ۶۰۶۱ به ۷۰۷۵ پرداختند و اثرات طول بین ابزار، تغییر سرعت دورانی و مقدار توقف ابزار بر استحکام ناحیه جوش را مورد ارزیابی قرار دادند و گزارش کردند که با افزایش طول پین، سرعت دورانی و زمان توقف ابزار استحکام جوش افزایش می‌یابد. آکینلابی همکارانش [۱۴] ریز ساختار و مکانیزم‌های شکست را در جوش‌های اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای ورق‌های آلیاژ ۵۰۸۳ بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که در منطقه اغتشاش دانه‌بندی بسیار ریزتر از دیگر مناطق بوده و بالاترین سختی را داراست همچنین کمترین سختی را HAZ و منطقه TMAZ داشته و شکست بیشتر در فصل مشترک این دو منطقه رخ داده است. لئو و همکارانش [۱۵] در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای آلومینیوم به مس دریافتند که اثر پارامترهای جوشکاری از جمله عمق نفوذ و لایه میانی مکمل روی بر کیفیت خواص مکانیکی اتصال تأثیرگذار است.

هو و همکارانش [۱۶] به بررسی اثر پارامترهای فرآیند نظیر سرعت دورانی و زمان توقف ابزار بر استحکام اتصال در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای آلیاژ آلومینیوم به مس پرداختند و گزارش کرده‌اند که با افزایش این پارامترها اندازه دانه‌ها کوچکتر شده و خواص مکانیکی اتصالات انجام شده بهبود یافته است. چن و همکارانش [۱۷] در بررسی پارامترهای موثر بر کیفیت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای ورق‌های آلومینیومی ۷۰۵۰ و ۲۵۲۴ به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت دورانی ابزار تا یک حد منجر به بهبود خواص مکانیکی و سختی نقطه جوش می‌شود.

در این مطالعه به بررسی خواص مکانیکی و میکرو سختی سنجی نمونه‌های جوشکاری شده اتصال غیرهمجنس در حالت‌های قرارگیری مختلف آلومینیوم و مس تحت اثر پارامترهای مختلف جوشکاری پرداخته شده و مقایسه‌ای مابین این خواص و خواص اتصال همجنس آلومینیوم و مس صورت گرفته است. همچنین تأثیر ترتیب قرارگیری آلیاژها حین عملیات جوشکاری بر خواص مکانیکی، نحوه شکست و گسیختگی از دگمه جوش اتصال مورد مطالعه قرار گرفته است.

## ۲- روش تحقیق

در این مطالعه جهت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای از ورق‌های آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-T6 و مس خالص تجاری با ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شده است. نمونه‌های آزمایش مطابق شکل ۲ به شکل صفحات مستطیلی شکل با ابعاد  $100 \times 32$  میلی‌متر تهیه شده و سطح قرارگیری و همپوشانی دو ورق بر روی هم  $32 \times 35$  میلی‌متر مربع تعیین و جوشکاری FSSW در مرکز این ناحیه انجام شده است.



شکل ۲ ابعاد هندسی و نمونه‌های آزمایش

لازم به ذکر است که قبل از انجام فرآیند جوشکاری ورق‌های آلومینیوم و مس به منظور حذف هرگونه آلودگی ابتدا سنباده‌زنی شده و سپس با استون تمیزکاری شدند. خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و مس مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ گزارش شده است.

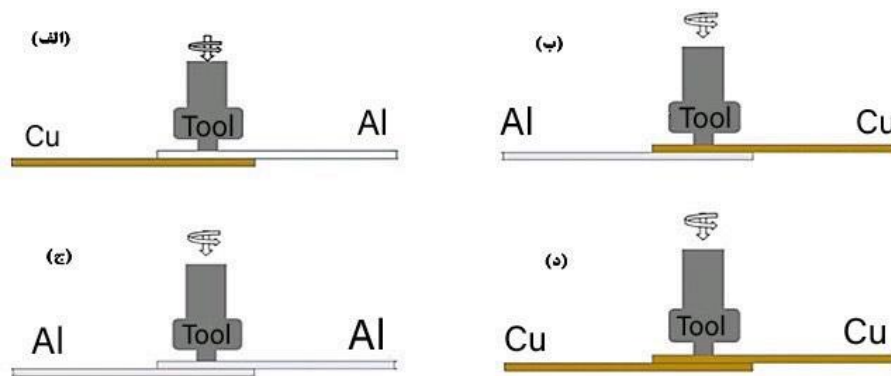
جدول ۱ خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم ۶۰۶۱-T6 و مس [۱۸]

فلز پایه	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	درصد تغییر شکل
آلومینیوم ۶۰۶۱	۲۲۲	۲۰۱	۸
مس خالص تجاری	۲۱۰	۱۸۵	۶/۵

جهت اعمال جوشکاری، ورق‌ها در چهار حالت مطابق شکل ۳ به صورت لبه روی هم قرار گرفتند: ۱- قرارگیری ورق آلومینیوم در قسمت فوقانی و ورق مس در قسمت تحتانی (حالت اول، شکل ۳-الف)، ۲- قرارگیری ورق مس در قسمت فوقانی و ورق آلومینیوم در قسمت تحتانی (حالت دوم، شکل ۳-ب)، ۳- قرارگیری ورق آلومینیوم در قسمت فوقانی و تحتانی (حالت سوم، شکل ۳-ج)، ۴- قرارگیری ورق مس در قسمت فوقانی و تحتانی (حالت چهارم، شکل ۳-د).

ابزار به کار گرفته شده جهت اعمال فرایند FSSW از جنس فولاد ابزار گرمکار H13 که رایج ترین نوع فولاد در ساخت ابزار مورد استفاده در جوشکاری می‌باشد [۱۶]. همچنین پس از ماشین‌کاری ابزار با استفاده از عملیات حرارتی سختی ابزار مذکور از ۱۵ راکول سی تا حدود ۵۵ راکول سی افزایش پیدا کرد. در این مطالعه از یک ابزار با ارتفاع و قطر شانه ۳۰ میلی‌متر و پین دارای رزوه‌های مارپیچ با ارتفاع و قطر به ترتیب ۳/۸ میلی‌متر و ۱۰ میلی‌متر استفاده شده است. فرایند جوشکاری توسط ماشین فرز مدل FP4M انجام گردید. با توجه به نیرو و گشتاور بالایی که در حین انجام فرایند به قطعات جوشکاری شونده وارد می‌شود؛ طراحی و قابلیت فیکسچر از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. لذا به منظور ثابت نگه داشتن نمونه‌ها در طول فرایند از فیکسچر و روبنده‌هایی مطابق شکل ۴ استفاده شده است.

جهت انجام فرایند جوشکاری زمان توقف ابزار بین ۲ تا ۱۵ ثانیه، عمق فرو روی ابزار ۳/۸ میلی‌متر و پارامتر سرعت دورانی ابزار ۵۰۰، ۸۰۰، ۱۲۵۰، ۱۶۰۰ و ۲۰۰۰ دور در دقیقه برای نمونه‌های جوشکاری در حالات قرارگیری مختلف استفاده شده است. پارامترهای مناسب که پس از سعی و خطا بدست آمده‌اند و منجر به کیفیت مطلوب نمونه‌های جوشکاری شده مطابق جدول ۲ می‌باشد.



شکل ۳ حالت‌های مختلف قرارگیری آلیاژهای آلومینیوم و مس، الف) آلومینیوم بالا، مس پایین ب) مس بالا، آلومینیوم پایین ج) آلومینیوم به آلومینیوم د) مس به مس



شکل ۴ فیکسچر و روبنده‌های نگهدارنده قطعات جوشکاری

جدول ۲ پارامترهای جوشکاری در حالات قرارگیری مختلف قطعات

شماره نمونه	حالات قرارگیری قطعات	حالات قرارگیری قطعات	سرعت دورانی (RPM)	زمان توقف (S)
۱	Cu- Cu (1)	مس- مس	۱۲۵۰	۵
۲	Cu- Cu (2)	مس- مس	۱۶۰۰	۱۰
۳	Al- Al (1)	آلومینیوم- آلومینیوم	۱۲۵۰	۵
۴	Al- Al (2)	آلومینیوم- آلومینیوم	۱۶۰۰	۱۰
۵	Cu- Al (1)	مس بالا- آلومینیوم پایین	۱۲۵۰	۵
۶	Cu- Al (2)	مس بالا- آلومینیوم پایین	۱۶۰۰	۱۰
۷	Al- Cu (1)	آلومینیوم بالا- مس پایین	۱۲۵۰	۵
۸	Al- Cu (2)	آلومینیوم بالا- مس پایین	۱۶۰۰	۱۰

جهت بررسی تجربی مقاومت کششی نمونه‌های جوشکاری شده از تست کشش مطابق استاندارد ASTM-E8 [۱۹] در دمای اتاق با نرخ کرنش ۲ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. بدین منظور نمونه‌ها با استفاده از وایرکات و عمود بر نقطه اتصال بریده و آماده شده‌اند. همچنین جهت سنجش مقاومت خمشی نمونه‌های مذکور از تست خمش مطابق استاندارد ASTM-E290 [۲۰] استفاده گردید. ابعاد نمونه‌های خمش به ترتیب طول و عرض و ضخامت  $۲۰۰ \times ۲۰ \times ۶$  میلی‌متر و فاصله بین تکیه‌گاه‌های خمش از مرکز اعمال نیرو در دو سمت از مرکز جوش ۶۰ میلی‌متر بوده است. در شکل ۵ نمونه‌های در حال تست کشش و خمش نشان داده شده است. بررسی میکرو سختی سنجی نواحی نمونه‌های جوشکاری شده نیز توسط دستگاه میکرو سختی سنجی ویکرز مدل FM700، مطابق استاندارد سختی سنجی ASTM-E384 [۲۱] با بار اعمالی ۵۰۰ گرم با زمان اثر ۵ ثانیه بر روی کلیه نمونه‌ها انجام شده است.



شکل ۵ تست‌های تجربی کشش و خمش

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- آزمون کشش

جوش‌های ایجاد شده توسط فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با توجه به پارامترهای فرآیندی انتخاب شده برای این روش جوشکاری دارای ویژگی‌ها و خواص مکانیکی متفاوتی خواهند بود. در این مطالعه ابتدا به بررسی پارامترهای مختلف جوشکاری در حالات قرارگیری مختلف قطعات جهت تعیین سطوح مناسب برای ایجاد جوشی با کیفیت و خواص مکانیکی بهینه پرداخته شده و در جدول ۳ نتایج حاصل از آزمون کشش ارائه شده است.

نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌های جوشکاری شده در وهله اول نشان می‌دهد که مقدار استحکام با تغییر پارامترهای جوشکاری همچون سرعت دورانی و زمان توقف ابزار تغییر نموده است. بطوریکه یک مقدار مناسب برای این پارامترها وجود دارد که

بیشتر یا کمتر از این مقدار افت استحکام جوش را به همراه خواهد داشت. با این تفاسیر مطابق جدول ۳ با افزایش پارامترهای جوشکاری در سرعت دورانی ابزار از ۱۲۵۰ به ۱۶۰۰ دور در دقیقه و زمان توقف ابزار از ۵ به ۱۰ ثانیه مقادیر استحکام تسلیم و نهایی در همه حالات قرارگیری نمونه‌های جوشکاری افزایش یافته است.

از دیگر مواردی که می‌توان از نتایج آزمون کشش به آن اشاره کرد مقادیر استحکام تسلیم و نهایی به دست آمده نمونه‌های جوشکاری شده مس به آلومینیوم می‌باشد. بطوریکه با قرارگیری مس در بالا و آلومینیوم در پایین بالاترین مقادیر استحکام تسلیم و نهایی به دست آمده است که می‌توان این نتیجه را به انتقال حرارت بالای مس مرتبط دانست. همچنین در وضعیت قرارگیری آلومینیوم در بالا و مس در پایین استحکام بسیار کاهش یافته است. از دیگر نکات بسیار مهم حاصل از نتایج آزمون کشش، کاهش استحکام نمونه‌های جوشکاری شده در همه حالات قرارگیری نمونه‌ها نسبت به فلزات پایه بوده که بدلیل حفره محل خارج شدن پین ابزار است که به نوعی تمرکز تنش محسوب گشته و در اثر کشش از همان نقطه شکست صورت می‌گیرد.

جدول ۳ نتایج آزمون کشش در پارامترها و حالات قرارگیری مختلف قطعات

شماره نمونه	حالات قرارگیری قطعات	سرعت دورانی (RPM)	زمان توقف (S)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)
۱	مس-مس	۱۲۵۰	۵	۱۰۵	۱۳۳
۲	مس-مس	۱۶۰۰	۱۰	۱۲۵	۱۶۰
۳	آلومینیوم-آلومینیوم	۱۲۵۰	۵	۱۲۲	۱۵۶
۴	آلومینیوم-آلومینیوم	۱۶۰۰	۱۰	۱۲۸	۱۶۲
۵	مس بالا-آلومینیوم پایین	۱۲۵۰	۵	۱۳۵	۱۷۶
۶	مس بالا-آلومینیوم پایین	۱۶۰۰	۱۰	۱۴۲	۱۸۸
۷	آلومینیوم بالا-مس پایین	۱۲۵۰	۵	۱۰۹	۱۴۸
۸	آلومینیوم بالا-مس پایین	۱۶۰۰	۱۰	۱۳۳	۱۷۴

با توجه به آزمون کشش اعمال شده بر قطعات جوشکاری شده می‌توان مقطع شکست جوش را بر اساس نحوه و محل گسیختگی به سه دسته کلی تقسیم نمود. در نوع اول گسیختگی جوش، دکمه جوش تحت تأثیر نیروهای کشش برشی در ابتدا دچار تغییر شکل پلاستیک شده و پس از کش آمدگی دچار شکست از دکمه جوش می‌گردد. شکل ۶ چگونگی کشیدگی دکمه جوش و در نهایت گسیختگی نمونه مس به آلومینیوم با قرارگیری مس در بالا را نشان می‌دهد.



شکل ۶ گسیختگی دکمه جوش بعد از کشیدگی زیاد دکمه جوش و جذب بالای انرژی شکست

همان‌طور که از مقطع شکست در شکل ۷ مشخص می‌باشد نوع دوم شکست از نوع گسیختگی برشی بوده که جوش از محل فصل مشترک دو ورق دچار گسیختگی شده است. ملاحظه می‌شود که در شرایط فوق مقادیر مناسب پارامترهای جوشکاری از جمله عمق نفوذ پین ابزار می‌تواند منجر به بهبود جوش و انواع شکل شکست گردد.



شکل ۷ گسیختگی برشی جوش از محل فصل مشترک دو ورق

مطابق شکل ۸ در نوع دیگری از سطح مقطع شکست جوش، ملاحظه شد که دکمه جوش از دایره محاط بر آن دچار گسیختگی می‌گردد. ملاحظه شد در تعدادی از نمونه‌های جوشکاری شده با ثابت بودن پارامترهای دیگر همچون سرعت دورانی و عمق نفوذ ابزار با کاهش زمان توقف از ۵ ثانیه به ۱۰ ثانیه کیفیت جوش انجام شده دچار افت شده است.



شکل ۸ گسیختگی سطحی جوش از محل دایره محاط بر دکمه جوش

### ۳-۲- آزمون خمش

در این پژوهش به جهت سنجش مقاومت به خمش قطعات جوشکاری شده اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در حالت‌های قرارگیری و پارامترهای مختلف جوشکاری از تست خمش سه نقطه‌ای استفاده شده است. در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمودارهای تغییرات جابجایی در تست خمش نمایش داده شده است. نتایج حاصل از تست خمش، بیانگر بالا بودن تغییرات نیرو جابجایی نمونه‌های جوشکاری شده در حالت قرارگیری ورق مس در بالا می‌باشد. همچنین از نتایج چنین استنباط می‌شود که مقاومت خمشی مقادیر جابجایی در نمونه‌های جوشکاری شده مس به مس و آلومینیوم به آلومینیوم در پارامترهای یکسان تقریباً به یک اندازه بوده و تفاوت زیادی با یکدیگر ندارند ولی جوشکاری صورت گرفته منجر به کاهش استحکام خمشی آن‌ها شده است. با توجه به نتایج مطروحه میتوان اینگونه استنباط کرد که بدلیل ویژگی انتقال حرارت بالا مس و جوش پذیری غیر همجنس مناسب با آلومینیوم، همچنین ترکیبات بین فلزی موجود در مس بر کیفیت استحکام خمشی موثر بوده و نسبت به نمونه‌های دیگر نتایج قابل ملاحظه‌تری را منجر گردیده است. همچنین تغییرات مقادیر جابجایی و نیرو به صورت نهایی و قبل برگشت در تست خمش با افزایش پارامترهای جوشکاری نظیر سرعت دورانی و زمان توقف ابزار در تمامی حالت‌های قرارگیری ورق‌ها افزایش یافته است.

شکل ۱۱ شکل ظاهری نمونه‌هایی که تست خمش بر روی آن‌ها اعمال شده است را نشان می‌دهد. نتایج نمودارهای تغییرات جابجایی در شکل‌های ۹ و ۱۰ هم مطابقت خوبی با شکل ظاهری نمونه‌های تست خمش شده دارد. با این تفاسیر می‌توان نتیجه گرفت نمونه‌های جوشکاری شده‌ای که مس در بالا بوده مقاومت خمشی بهتری از خود نشان داده است. پایین‌ترین مقادیر به دست آمده از آزمون خمش مربوط به نمونه‌های با وضعیت قرارگیری آلومینیوم در بالا و مس در پایین بود و در شکل ظاهری نمونه‌های اعمال خمش شده ملاحظه می‌شود که دچار شکست گردیده است. قابل ذکر است که در سایر حالات قرارگیری نمونه‌ها مقاومت خمشی پایین‌تری مشاهده شده است.



شکل ۹ نمودارهای تغییرات جابجایی در حالت‌های قرارگیری مختلف قطعات در نمونه‌های همجنس



شکل ۱۰ نمودارهای تغییرات جابجایی در حالت‌های قرارگیری مختلف قطعات در نمونه‌های غیر همجنس

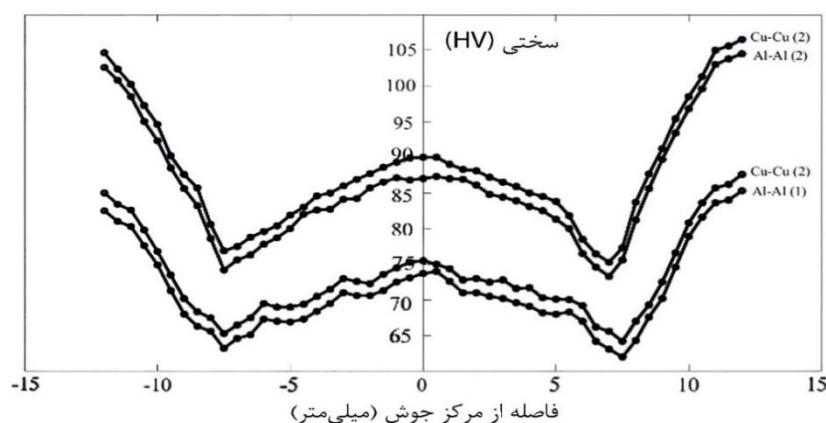


شکل ۱۱ نمونه‌های تست خمش شده حالات مختلف قرارگیری ورق‌های مس و آلومینیوم



## ۳-۳- میکروسختی سنجی

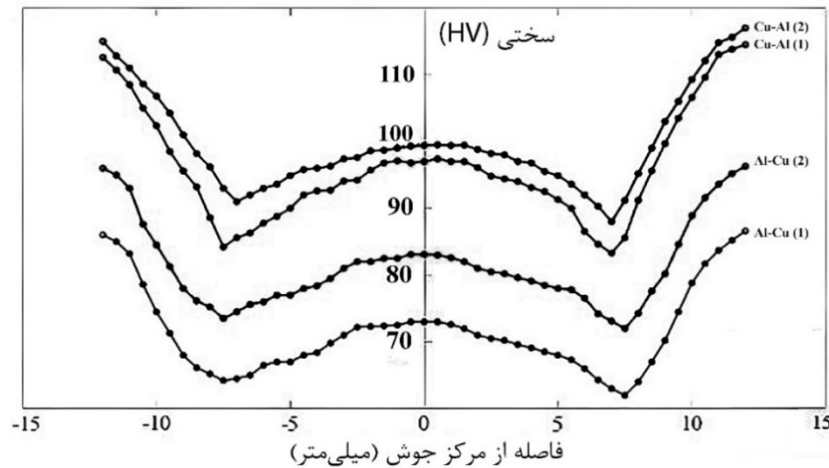
شکل ۱۲ پروفیل‌های سختی برای نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای مس به مس و آلومینیوم به آلومینیوم را در پارامترهای مختلف مطابق جدول ۳ نشان می‌دهد. بر اساس شکل پروفیل سختی در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ با حرکت از مرکز نمودار (ناحیه اغتشاشی) به سمت لبه‌ها مقدار سختی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. تکرار پذیری و صحت سنجی نتایج میکروسختی سنجی بر روی سه نمونه کاملاً مشابه صورت پذیرفته و ارائه گردیده است که دلیل این کاهش و افزایش سختی مربوط به اندازه دانه بر اساس رابطه هال پیچ و نیز اندازه رسوبات بوده که پروفیل سختی در آلیاژهای آلومینیوم رسوب‌سخت شونده به شدت به توزیع رسوبات وابسته بوده و وابستگی کمی به ساختار دانه و نابجایی‌ها دارد. بطوریکه مشاهده می‌شود با وجود ریزدانه و هم‌محور شدن دانه‌ها در منطقه اغتشاشی سختی این ناحیه نسبت به فلز پایه افت پیدا کرده است. این کاهش سختی بدلیل انحلال رسوبات، درشت شدن آن‌ها همچنین ناکافی بودن نرخ سرد شدن می‌باشد. به عبارت ساده‌تر می‌توان گفت که دانسیته پایین رسوبات سخت‌شونده در منطقه اغتشاشی باعث افت سختی ناحیه جوش نسبت به فلز پایه می‌شود. در ناحیه اغتشاشی، اندازه دانه به سبب پدیده تبلور مجدد ریز و رسوبات در اثر چرخش ابزار شکسته شده و به رسوبات ریز تبدیل شده‌اند که هر دو عامل، سبب افزایش در سختی در این ناحیه است [۲۲]. همچنین قابل ذکر است که با توجه به تفاوت سرعت دورانی ابزار از مرکز به سمت لبه، گرادپان اندازه دانه به وجود می‌آید که تفاوت سختی در لبه‌ها و مرکز را به همراه دارد؛ اما با رسیدن به ناحیه متأثر از حرارت به سبب رشد دانه و رسوبات، سختی به میزان قابل توجهی کاهش یافته و با رسیدن به فلز پایه سختی مجدداً افزایش می‌یابد. در شکل ۱۲ پروفیل سختی نمونه‌ها نشان می‌دهد که سختی نمونه مس به مس و آلومینیوم به آلومینیوم با افزایش پارامترهای جوشکاری افزایش یافته و بیشترین مقدار سختی در نمونه دوم مس به مس بوده و سختی در سایر نمونه‌ها به مراتب کمتر بوده است.



شکل ۱۲ نمودار پروفیل میکروسختی اتصال مس به مس و آلومینیوم به آلومینیوم

قابل ذکر است که مطابق شکل نمودار ۱۳ روند مشابهی برای پروفیل‌های سختی در جوشکاری حالت‌های قرارگیری مس در بالا و آلومینیوم در پایین و بالعکس مشاهده شد، با این تفاوت که مقدار سختی در حالتی که مس در بالا و آلومینیوم در پایین قرار داشت بالاتر به دست آمده است. از دیگر مواردی که می‌توان به آن اشاره کرد که پروفیل سختی برای تمام نمونه مشابه است؛ اما افزایش بهینه و مناسب در هر دو پارامتر زمان توقف یا نگهداری و سرعت دورانی افزایش در سختی را در نواحی مختلف به دنبال دارد. در نمونه‌هایی که آلومینیوم در بالا قرار گرفته چون پیرسازی در آلیاژهای رسوب سخت شونده همانند آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نیز منجر به ایجاد رسوبات بسیار ریز با فواصل کم می‌گردد. آن‌ها نیز به عنوان موانع حرکت نابجایی‌ها افزایش استحکام ماده مورد نظر را در پی خواهند داشت. به عبارت ساده‌تر می‌توان گفت که دانسیته پایین رسوبات سخت‌شونده در منطقه اغتشاشی باعث افت سختی ناحیه جوش نسبت به فلز پایه می‌شود. همچنین مواد در ورق پایین کمتر دچار اغتشاش می‌شود که همین عامل، درشت بودن رسوبات را به دنبال دارد [۲۳].

قابل ذکر است بدلیل اینکه در دو منطقه متأثر از حرارت و متأثر از عملیات ترمومکانیکی که مجاور ناحیه اغتشاشی و فلز پایه میباشند دما به اندازه کافی افزایش نیافته و تبلور مجدد دینامیکی در این منطقه رخ نداده که در این ناحیه افت سختی نسبت به مرکز جوش مشاهده می‌شود. همچنین نرخ بالای سرد شدن در این مناطق باعث تسریع در رسوب گذاری فازهای استحکام بخش می‌شود.



شکل ۱۳ نمودار پروفیل میکروسختی اتصال مس به آلومینیوم و آلومینیوم به مس

فرایند جوشکاری FSSW شامل مجموعه‌ای از جریان مواد تغییر شکل یافته می‌باشد که وابسته به پارامترهای مختلف فرایند بوده و منتج به ریزساختار بسیار اصلاح‌شده‌ای گشته که مستقیماً بر خواص مکانیکی تأثیرگذار می‌باشد. با توجه به بررسی نتایج آزمون‌های کشش، خمش سه نقطه‌ای و میکروسختی سنجی در افزایش سرعت دورانی و زمان توقف ابزار حرارت تولیدی ناشی از اصطکاک شانه ابزار و قطعه کار افزایش یافته که منجر به کاهش اندازه دانه گردیده که ایجاد این ریزدانه‌گی بر اساس رابطه هال-پچ با توجه به کاهش اندازه دانه و متعاقب آن افزایش مرزدانه‌ها، باعث افزایش چشمگیر سختی و استحکام ماده می‌گردد.

### ۳-۴- کیفیت شکل ظاهری

سرعت دورانی و زمان توقف یا نگهداری ابزار از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر کیفیت استحکام و شکل ظاهری نمونه‌های جوشکاری شده با فرایند اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای می‌باشند [۲۴]. اثر سرعت دورانی و زمان توقف یا نگهداری ابزار بر ویژگی‌های سطح ظاهری جوش در شکل‌های ۱۴ در حالت‌های مختلف قرارگیری قطعات ذکر شده در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل‌ها و استفاده از ابزار مناسب با پارامترهای مناسب در سرعت‌های دورانی ۱۲۵۰ و ۱۶۰۰ دور در دقیقه و زمان توقف یا نگهداری ۵ و ۱۰ ثانیه سطح ظاهری از جوش کاملاً صاف بوده و فرورفتگی و سایر اعوجاجات جوشی مشاهده نمی‌شود. قابل ذکر است که تغییر پارامترهای فرآیند، زمان نگهداری و سرعت دورانی ابزار سطح ظاهری اتصال را تغییر داده است.

با افزایش زمان توقف ابزار از ۱۰ به ۱۵ ثانیه و با افزایش سرعت دورانی ابزار از ۱۶۰۰ به ۲۰۰۰ دور در دقیقه به دلیل افزایش حرارت ورودی اصطکاکی که در نتیجه افزایش سیلان و حجم مواد خمیری در نواحی نزدیک به فصل مشترک را به دنبال دارد که سطح ورق‌های مس و آلومینیوم بیش از حد نرم و خمیری شده و اتصال نامناسب رخ داده است. همچنین در سرعت‌های دورانی ابزار کمتر از ۱۲۵۰ دور در دقیقه و زمان توقف ابزار کمتر از ۱۰ ثانیه به دلیل کاهش تولید حرارت ورودی اتصال مناسب در ناحیه جوش مشاهده نشده است.



شکل ۱۴ شکل ظاهری نمونه‌های جوشکاری در پارامترهای مختلف

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به صورت تجربی به بررسی تأثیرات سرعت دورانی و زمان توقف ابزار بر کیفیت و خواص مکانیکی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به مس در پارامترها و حالات قرارگیری مختلف ورق‌ها پرداخته شد که نتایج به دست آمده از این مطالعه به قرار بندهای زیر است:

- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای موفقیت‌آمیز آلومینیوم - مس در حالات قرارگیری مختلف ورق‌ها.
- کیفیت ظاهری مطلوب نمونه‌های جوشکاری شده
- در سرعت دورانی و زمان توقف پایین‌تر از ۱۲۵۰ دور در دقیقه و ۵ ثانیه و بالاتر از ۱۶۰۰ دور در دقیقه و ۱۰ ثانیه نمونه‌های جوشکاری شده دارای عیوبی همچون عدم اتصال، نرم و خمیری شدن بیش از حد بوده است.
- با افزایش پارامترهای جوشکاری در تمامی نمونه‌های جوشکاری شده استحکام کششی، خمشی و سختی اتصالات افزایش یافته است.
- بالاترین استحکام کششی، خمشی و سختی در حالت قرارگیری ورق مس در بالا و آلومینیوم در پایین و کمترین مقادیر در حالت قرارگیری ورق آلومینیوم در بالا و مس در پایین به دست آمده است.
- میکروسختی سنجی کاملاً تحت تأثیر فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بوده و موجب اصلاح ساختار و ریزدانه‌نگی نسبت به فلز پایه شده است.
- رسوب سخت‌شونده بودن آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و ترکیبات بین فلزی موجب کاهش سختی ناحیه جوش نسبت به فلز پایه شده است.

#### References

- [1] Ahmed M A, Ahmed A H, Ali A A. Microstructure and mechanical properties of dissimilar aluminum alloy joints by friction stir welding. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020. 29:4845– 4856. doi: [10.3390/met11010128](https://doi.org/10.3390/met11010128)
- [2] Kummari S R, Prasad S S, Murty B S. Mechanical and metallurgical characterization of dissimilar Al alloys joints produced by friction stir welding. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. 10:24–34. doi: [10.1016/j.matdes.2008.04.042](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.04.042)
- [3] Kumar R, Kumar A, Kumar A, Kumar V. Effect of rotational speed on microstructure and mechanical properties of dissimilar aluminum alloys AA6061-T6 and AA7075-T6 friction stir spot welded joints. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. 62:185–192. doi: [10.1007/s13632-016-0315-8](https://doi.org/10.1007/s13632-016-0315-8)
- [4] Manickam S, Rajendran C, Ragu S, Sivamaran V, Balasubramanian V. Assessment of the influence of FSSW parameters on shear strength of dissimilar materials joint (AA6061/AZ31B). *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2023. 6:33– 45. doi: [10.1016/j.ijlmm.2022.07.005](https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2022.07.005)
- [5] Tankoua AT, Kohler T, Bergmann J P, Gratzel M, Betz P, Lindenau D. Tool downscaling effects on the friction stir spot welding process and properties of current-carrying welded aluminum-copper joints for e-mobility applications. *Metals*. 2021. 11:1-20. doi: [10.3390/met11121949](https://doi.org/10.3390/met11121949)

- [6] Yangfan Z, Wenya L, Xiawei Y, Yu S, Qiang C, Zhikang S. Microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welded joints: Effects of tool size and welding parameters, *Journal of material research and technology*. 2022. 21:5066- 5080. doi: [10.1016/j.jmrt.2022.11.108](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.108)
- [7] Gera D, Fu B, Suhuddin U, Plaine A, Alcantara N, dos S F. Microstructure, mechanical and functional properties of refill friction stir spot welds on multilayered aluminum foils for battery application. *J Mater Res Technol*. 2021. 13:2272-2286. doi: [10.1016/j.jmrt.2021.06.017](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.017)
- [8] Paidar M, Khodabandeh A, Najafi A. Effects of the tool rotational speed and shoulder penetration depth on mechanical properties and failure modes of friction stir spot welds of aluminum 2024-T3 sheets. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2014. 12:4893-4898. doi: [10.1007/s12206-014-1108-0](https://doi.org/10.1007/s12206-014-1108-0)
- [9] Zhikang S, Yuquan D, Adrian P. Advances in friction stir spot welding. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2020. 9:457- 534. doi: [10.1080/10408436.2019.1671799](https://doi.org/10.1080/10408436.2019.1671799)
- [10] Vidyasagar S, Balaji A, Sharif S, Uthayakumar R. Influence of multi-pass friction stir spot welding on microstructure and mechanical properties of dissimilar aluminum alloy joints. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. 10:449 459. doi: [10.1016/j.jalmes.2023.100010](https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2023.100010)
- [11] Zhang H. Effect of tool plunge depth on the microstructure and fracture behavior of refill friction stir spot welded AZ91 magnesium alloy joints. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2021. 28:699-709. doi: [10.1007/s12613-020-2044-x](https://doi.org/10.1007/s12613-020-2044-x)
- [12] Li M, Zhang C, Wang D, Zhou L, Wellmann D, Tian Y. Friction stir spot welding of aluminum and copper. A review. *Materials*. 2020. 13:156- 164. doi: [10.3390/ma13010156](https://doi.org/10.3390/ma13010156)
- [13] Hussein A M A, Ali A M M, Serry M S A, Alaskari A M. Influence of tool traverse speed and rotational speed on the mechanical properties and microstructure of dissimilar AA6061-T6 and AA7075-T6 friction stir spot welded joints. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. 9:9781-9791. doi: [10.1177/09544089221080823](https://doi.org/10.1177/09544089221080823)
- [14] Akinlabi E T, Osinubi A S, Madushele N, Akinlabi S A, Ikumapayi O M. Data on micro hardness and structural analysis of friction stir spot welded lap joints of AA5083-H116, Data in Brief. 2020. 33:106- 118. doi: [10.1016/j.dib.2020.106585](https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106585)
- [15] Liu H, Ma L, Gong P, Dong J, Yue Y. Friction stir spot welding of Al- Cu with different Zn foils. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2022. 2:56- 66. doi: [10.1007/s12666-022-02792-2](https://doi.org/10.1007/s12666-022-02792-2)
- [16] Hou W, Shen Z, Huda N, Oheil M, Shen Y, Jahed H. Enhancing metallurgical and mechanical properties of friction stir butt welded joints of Al- Cu via cold sprayed Ni interlayer. *Materials Science and Engineering*. 2021. 5:809- 821. doi: [10.1016/j.msea.2021.140992](https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.140992)
- [17] Chen D, Li J L, Xiong J T, Shi J M, Dou J X, Zhao H X. Enhance mechanical properties of refill friction stir spot welding joint of alloy 7050/2524 aluminum via suspension rotating process. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. 12:1243-1251. doi: [10.1016/j.jmrt.2021.03.067](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.067)
- [18] Venukumar S, Baby B, Muthukumar S, Kailas S V. Microstructural and Mechanical Properties of Walking Friction Stir Spot Welded AA 6061-T6 Sheets, *Procedia Materials Science*. 2014. 6:656- 665. doi: [10.1016/j.mspro.2014.07.081](https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.081)
- [19] ASTM-E8, Standard Mechanical testing and Evaluation Tensile testing. American Society for Testing and Material. 2000.
- [20] ASTM-E290, Standard test method for Bend testing of material for ductility. American Society for Testing and Material. 1998.
- [21] ASTM-E384, Standard test method for micro- hardness of materials, American Society for Testing and Material. 2008.
- [22] Bilici M, Hunt F. The optimization of welding parameters for friction spot welding of high-density polyethylene sheets. *Materials and Design*. 2009. 7:4074-4079. doi: [10.1016/j.matdes.2011.03.014](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.014)
- [23] Tozaki Y, Uematsu Y, Tokaji K. Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminum alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007. 11:2230-2236. doi: [10.1016/j.ijmachtools.2007.07.005](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.07.005)
- [24] Tran V, Pan J, Pan T. Effects of processing time on strengths and failure modes of dissimilar spot friction welds between aluminum 5754-O and 7075-T6 sheets. *Journal of materials processing technology*. 2009. 8: 3724-3739. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2008.08.028](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.08.028)