مقایسه‌ی تاثیر استفاده از ابزار دوشانه‌ای و تک‌شانه‌ای در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر بهبود خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ آلومینیوم 6061-T6

محمد عظیمی آق قلعه[۱]، میثم اکثیری[۲*]، نصراله بنی مصطفی عرب[۳]، سروش پرویزی[۴]، امیر رفاهی اسکویی[۵]

۱- دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
۲- دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
۳- دانشیار، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران
۴- استادیار، مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران
۵- استادیار، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران
*گلپایگان، صندوق پستی ۸۷۷۱۶۵۶۳۹۶، meysameksiri7@yahoo.com

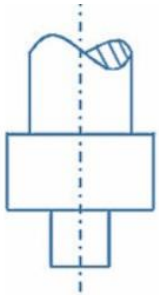
Describing the effect of Bobbin and conventional tool in Friction Stir process on improving mechanical properties and microstructure in Aluminum 6061-T6 alloy

Mohamad Azimi Aghghaleh[1], Meysam Eksiri[2], Nasrolah Bani Mostafa Arab[3], Soroush Parvizi[4], Amir Refahi Oskoui[5]

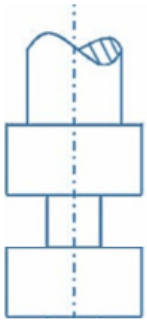
1- postgraduate student of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
2- postgraduate student of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
3- - Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
4- - Department of Metallurgical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
5- - Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
* P.O.B. 8771656396 Golpayegan, Iran, meysameksiri7@yahoo.com

۱- مقدمه

آلومینیوم و آلیاژهای آن علی‌رغم دارا بودن خواص مکانیکی مطلوبی از جمله قابلیت شکل‌پذیری، ماشین کاری و وزن سبک نسبت به استحکام بالا، دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های این فلز پرکاربرد روش اتصال آن است. با توجه به هدایت حرارتی نسبتا بالای آلومینیوم، امکان استفاده از روش‌های معمول جوشکاری برای اتصال قطعاتی از این جنس پایین آمده است؛ زیرا برای ایجاد یک حوضچه‌ی جوش مناسب، نیاز به تمرکز حرارت در محدوده‌ی خط اتصال می‌باشد که این فلز به دلیل فوق، چنین امکانی را دارا نیست. از دیگر دشواری‌های موجود پیرامون اتصال قطعات آلومینیومی می‌توان به مزاحمت پوسته‌های اکسیدی و همچنین ایجاد حفره-های هیدروژنی اشاره نمود که لزوم به کارگیری روش‌های اتصال غیر ذوبی را بیش از پیش نمایان می‌سازد[۱]. در همین راستا امروزه از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی جهت اتصال قطعات آلومینیومی استفاده می‌شود. در این روش از ابزاری غیر مصرفی استفاده می‌شود که معمولا مطابق شکل Error! **No text of specified style in document.**-۱ دارای یک شانه و یک پین می‌باشد. اساس این فرآیند بر مبنای حرارت تولید شده‌ی ناشی از اصطکاک میان ابزار در حال دوران و قطعه کار می‌باشد. البته امروزه استفاده از نسل جدیدی از این ابزارها در حال گسترش است. عمده‌ترین تفاوت میان ابزارهای مذکور با انواع قبلی خود، اضافه شدن یک شانه‌ی پایینی علاوه بر شانه‌ی بالایی قبلی است که سبب بالاتر رفتن میزان گرمای ورودی برای شکل‌گیری اتصال می‌باشد. نمایی از ابزار دوشانه‌ای مورد استفاده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در شکل Error! **No text of specified style in document.**-۲ نمایش داده شده است.



شکل **Error! No text of specified style in document.**-۱ ابزار تک شانه ای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [۲]



شکل **Error! No text of specified style in document.**-۲ ابزار دوشانه ای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

در همین راستا، تامادن[1] و همکارانش نیز در تحقیقی امکان استفاده از چنین ابزاری را برای اتصال قطعات فلزی مورد بررسی قرار دادند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که بهره‌گیری از این ابزار جهت مقصود فوق بلامانع می‌باشد[۳].

همچنین در پژوهشی دیگر ایلانگوان[2] و همکاران او دریافتند که استفاده از ابزارهای تک شانه‌ای با پارامترهای هندسی مختلف از جمله ابعاد و شکل هندسی متفاوت پین و شانه، تاثیرات گوناگونی بر خواص مکانیکی و ریزساختاری اتصالات فلزی دارد[۴].

در پژوهش پیش رو، تاثیر استفاده از ابزار دوشانه‌ای در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نسبت به ابزار تک شانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. این فرآیند بر روی آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 و تحت سرعت‌های دورانی ۱۵۰۰، ۱۱۸۰، ۹۵۰ و ۷۵۰ دور بر دقیقه به کمک ابزاری از جنس فولاد گرمکار H13 انجام شده و نتایج آزمون‌های ضربه شارپی، کشش، بررسی میکروساختار و ماکروساختار بدست آمده با داده‌های موجود حاصل از کاربرد ابزار تک شانه‌ای با پارامترهای مشابه مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق دارای ابعاد ۴×۵۰×۱۰۰ میلی‌متر بوده و از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ تهیه شده‌اند. ویژگی‌های مکانیکی و عناصر سازنده‌ی این آلیاژ در جدول **Error! No text of specified style in document.**-۱ و جدول **Error! No text of specified style in document.**-۲ نمایش داده شده است. جنس آلیاژ مورد استفاده برای ساخت ابزار دوشانه‌ای نیز فولاد گرمکار H13 بوده و ترکیبات شیمیایی آن مطابق جدول **Error! No text of specified style in document.**-۳ می‌باشد. ابزار مذکور بر اساس نقشه‌ی موجود در شکل **Error! No text of specified style in document.**-۳ ساخته شده و در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول **Error! No text of specified style in document.**-۱ ویژگی های مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

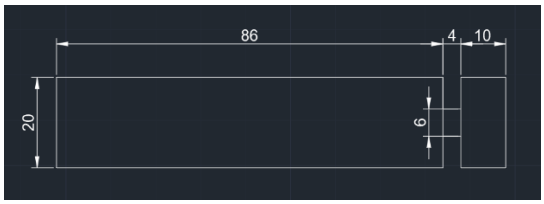
سختی برینل	درصد تغییر طول	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)
۱۵۰	۱۷	۳۲۴	۳۸۶

جدول **Error! No text of specified style in document.**-۲ عناصر سازنده ی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

کروم (٪)	منیزیم (٪)	منگنز (٪)	مس (٪)	آهن (٪)	سیلیسیم (٪)	آلیاژ آلومینیوم
۰/۱۵ - ۰/۳۵	۰/۸ - ۱/۲	۰/۲ - ۰/۸	۰/۱۵ - ۰/۴	ماکزیمم ۰/۷	۰/۴ - ۰/۸	۶۰۶۱

جدول **Error! No text of specified style in document.**-۳ترکیبات شیمیایی فولاد گرمکار H13

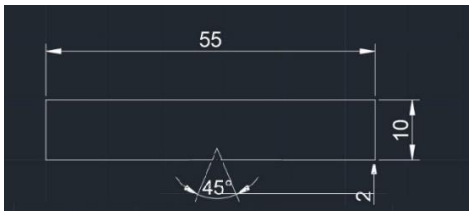
Cr (%)	Mo (%)	Si (%)	V (%)	C (%)	Ni (%)	Cu (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Fe (%)
۴/۷۵-۵/۵	۱/۱۰-۱/۷۵	۰/۸۰-۱/۲۰	۰/۸۰-۱/۲۰	۰/۳۲-۰/۴۵	۰/۳	۰/۲۵	۰/۲۰-۰/۵۰	۰/۰۳	۰/۰۳	باقی‌مانده



شکل **Error! No text of specified style in document.**-۳ نقشه ی ابزار دوشانه‌ای

برای انجام فرآیند جوشکاری از دستگاه فرز مدل FV32×152 ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز استفاده شده و پیش از شروع فرآیند اتصال، جهت فراهم ساختن محلی برای قرارگیری ابزار، شیاری نیم‌دایره‌ای شکل و با قطر ۶ میلی‌متر در ابتدای خط اتصال ایجاد شده است. پس از اتمام فرآیند نیز برای بررسی خواص مکانیکی و متالورژیکی نمونه‌های بدست آمده، آزمون‌هایی بر روی آن‌ها اجرا شده که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

جهت بررسی میزان مقاومت به ضربه‌ی قطعات جوشکاری شده، آزمون ضربه شارپی بر روی آن‌ها اجرا شد. برای انجام این آزمایش نمونه‌ها مطابق شکل **Error! No text of specified style in document.**-۴ در اندازه‌های ۴×۱۰×۵۵ میلی‌متر برش داده شده و شیاری V شکل به عمق ۲ میلی‌متر نیز در آن تعبیه شد. دستگاه مورد استفاده SANTAM مدل SIT-200B بوده و انرژی پرتابه‌ی آن برابر ۲۰۰ ژول و زاویه‌ی آن در آغاز آزمایش نیز ۱۴۹/۶ درجه تنظیم گردید. برخی از نمونه‌های آزمایش شده در این آزمون در شکل **Error! No text of specified style in document.**-۵ نمایش داده شده است.



شکل **Error! No text of specified style in document.**-۴ ابعاد نمونه های آزمون ضربه شارپی

اجرای آزمایش سختی سنجی نمونه‌ها نیز به کمک دستگاه ویکرز شرکت Koopaسری universal hardness tester مدل UV1 Model صورت پذیرفت. نیروی اعمال شده در این آزمون برابر ۳۰ کیلوگرم و قسمت فرورنوده‌ی دستگاه هرمی با زوایای ۱۳۶ درجه میان وجوه بود.

1 ATamadon
2 Mlangovan

شکل **Error! No text of specified style in document.**-۵نمونه های آزمایش شده در آزمون ضربه شارپی

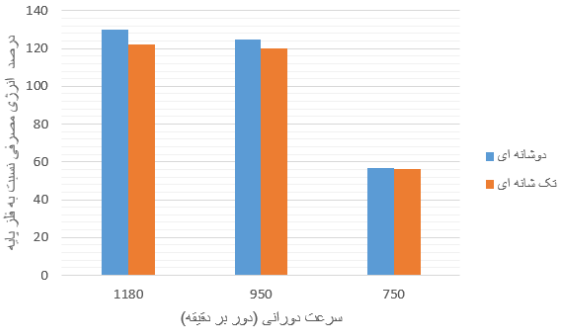
برای بررسی استحکام مکانیکی نمونه‌های جوشکاری شده، تست کشش انجام شد. قطعات نمونه انتخاب شده بر پایه استاندارد ASTM-E8 طبق شکل **Error! No text of specified style in document.**-۶ برش داده شدند.آزمون کشش تک محوری به‌کمک دستگاه شرکت Zwick Roell آلمان با شاخصه‌های اندازه‌گیری، نیروN، تنشMPa، جابجاییΔL در دمای اتاق و سرعت اجرای کشش سه میلیمتر بر دقیقه انجام شد.

شکل **Error! No text of specified style in document.**-۶ تصویر نمونه کشش تهیه شده براساس استاندارد ASTM-E8

برای بررسی ساختار نمونه نیز بعد از بررسی سلامت ظاهری قطعات، نمونه بصورت تصادفی و عمود بر خط اتصال با تیغه برش در ابعاد ۵۵×۱۰×۴ برش داده شد. سپس بعد از مراحل سنباده، پولیش و اچ‌کردن، نمونه‌ها به کمک میکروسکوپ نوری OLYMPUS PME3 عکسبرداری شدند.

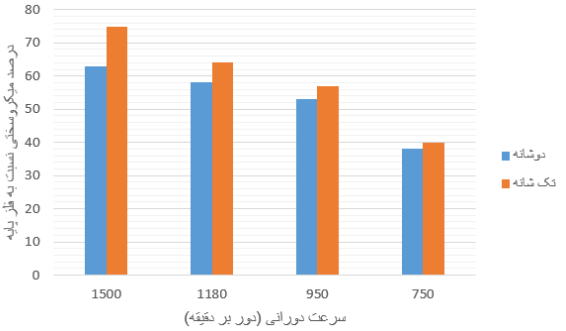
۳- نتایج و بحث

با بررسی داده‌های حاصل از آزمون ضربه شارپی و مقایسه‌ی آن‌ها با نتایج موجود در پژوهش‌های صورت گرفته به کمک ابزار تک شانه‌ای [۵و۶] می‌توان دریافت که درصد انرژی مصرف شده نسبت به فلز پایه بر حسب ژول، در زمان استفاده از ابزار دوشانه‌ای افزایش داشته است. بر همین اساس مشخص می‌گردد که اتصال صورت گرفته با استفاده از ابزار مذکور دارای مقاومت به ضربه‌ی بهتری نسبت به نمونه‌ی جوشکاری شده با پارامترهای مشابه به وسیله‌ی ابزار تک شانه‌ای است. اصلی‌ترین دلیل این امر نیز به ایجاد حرارت تقریبا یکنواخت از دو سمت خط اتصال برمی‌گردد. مطابق شکل Error! **No text of specified style in document.**-۷ با توجه به وجود دو شانه در بالا و پایین خط جوش، اصطکاک میان شانه‌های ابزار و قطعات باعث ایجاد ساختاری همگن‌تر از جوشکاری با ابزار معمولی شده و بر مقاومت اتصالات نهایی تاثیر مثبتی می‌گذارند. البته این تاثیر در سرعت‌های بالا ملموس‌تر بوده؛ به طوری که در سرعت چرخشی ۱۱۸۰ دور بر دقیقه، انرژی نسبی مصرف شده در جوش به کمک ابزار دوشانه‌ای در حدود ۹ درصد بیشتر بوده است. در حالی که در سرعت‌های پایین این تفاوت به رقم ناچیزی در حد یک درصد می‌رسد. این امر از بهبود خواص مکانیکی اتصال انجام شده در سرعت‌های دورانی بالا حکایت نموده و راهکار مناسبی برای تولید قطعات مستحکم‌تر در مقیاس‌های صنعتی به نظر می‌رسد.



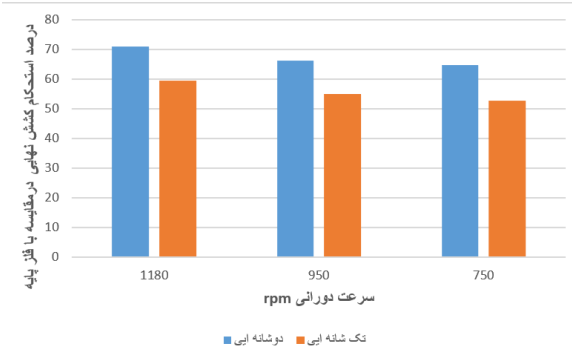
شکل **Error! No text of specified style in document.**-۷ مقایسه ی درصد انرژی مصرف شده نسبت به فلز پایه با استفاده از ابزارهای دوشانه ای و تک شانه ای

داده‌های حاصل از آزمون میکروسختی اتصالات صورت گرفته نیز با نتایج مشابهی که پیش از این به کمک ابزار تک شانه‌ای بدست آمده بود [۵و۷و۸] ، مورد مقایسه قرار گرفت. همان‌طور که در شکل Error! **No text of specified style in document.**-۸ نیز نمایش داده شده است، در این بررسی‌ها مشخص گردید که میکروسختی جوش‌های انجام شده به وسیله‌ی ابزار دوشانه‌ای دارای مقادیر کمتری نسبت به اتصالات مشابهی هستند که با استفاده از ابزار تک شانه‌ای انجام شده‌اند. از جمله دلایل این تفاوت می‌توان به رخ دادن پدیده‌ی تبلور مجدد به صورت بهتر و کامل‌تر در هنگام استفاده از ابزار دوشانه‌ای اشاره نمود. این اتفاق به سبب گرمای یکنواختی است که از اصطکاک میان شانه‌های بالا و پایین ابزار و قطعه کار به وجود آمده است. از طرفی این حرارت ورودی ایجاد شده، سبب انحلال بیشتر و کامل‌تر فازهای رسوبی موجود در ناحیه‌ی اغتشاش اتصالات صورت گرفته به کمک ابزار جدید شده و تغییرات میکروسختی مذکور را رقم می‌زند. البته همانطور که ملاحظه می‌شود تفاوت‌های موجود در سرعت‌های بالاتر بیشتر بوده که عمده‌ترین دلیل آن نیز به اختلاف بیشتر حرارت ورودی در این سرعت‌های در زمان استفاده از ابزارهای گوناگون برمی‌گردد.



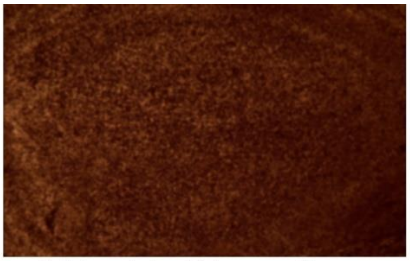
شکل **Error! No text of specified style in document.**-۸ مقایسه ی درصد میکروسختی نسبت به فلز پایه با استفاده از ابزارهای دوشانه ای و تک شانه ای

برای بررسی عملکرد دوشانه‌ایی نسبت به ابزار تک شانه‌ایی با مقایسه نتایج با پژوهش دکتر لون [۹] و همکاران مقایسه صورت گرفت که در شکل ۸ بصورت درصد استحکام کششی (فلز پایه ۱۰۰درصد درنظر گرفته شد) نشان داده شده است. همانطور که درشکل نشان داده شده‌است تقریبا تا ۱۴درصد اختلاف مشاهده شد که نشان می‌دهد که ابزار دوشانه با پخش بهتر حرارت موجب ایجاد ریزساختار بهتر و درنتیجه استحکام بهتر می‌گردد.

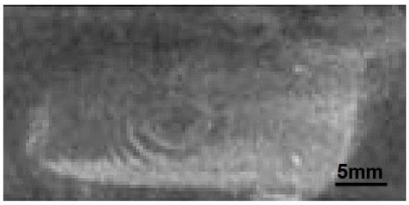


شکل **Error! No text of specified style in document.**-۹ مقایسه ی درصد استحکام کشش نسبت به فلز پایه با استفاده از ابزارهای دوشاته ای و تک شانه ای

در بررسی نواحی در ناحیه NZ با مقایسه پژوهش لیو[۲] و همکاران [۱۰] همانطور که در شکل۱۸ دیده می‌شود ناحیه در ابزار دوشانه‌ایی دارای فرم یکنواخت‌تری بوده که دلیل آن حرکت یک پارچه ابزار در راستای خط اتصال است که با پخش یکنواخت‌تر حرارت موجب سیلان بهتر مواد شده و دانه-بندی منظم‌تر می‌گردد.



محدوده ناگت در جوشکاری ابزار دو شانه ایی



محدوده ناگت در جوشکاری ابزار تک شانه ایی

شکل **Error! No text of specified style in document.**-۱۰ مقایسه ی محدوده ی ناگت در جوشکاری با استفاده از ابزارهای دوشانه ای و تک شانه ای

۴-نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تاثیر استفاده از ابزار دوشانه‌ای در اجرای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر بهبود خواص مکانیکی و متالورژیکی آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 نسبت به انجام فرآیند مشابه به کمک ابزار تک شانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج حاصل عبارتند از:

۱. درصد مقاومت به ضربه‌ی اتصالات صورت گرفته با استفاده از ابزار دوشانه-ای نسبت به جوش انجام شده با پارامترهای مشابه به وسیله‌ی ابزار معمولی بهبود یافته است.

۲. درصد میکروسختی نمونه‌های جوشکاری شده بهب کمک ابزار دوشانه‌ای تا حد قابل قبولی نسبت به زمان استفاده از ابزار تک شانه‌ای کاهش داشته است.

۳. درصد استحکام کششی اتصالات بدست آمده با این روش، حدود ۱۴ درصد بهبود یافته است.

۴. با تغییر در دانه‌بندی نمونه‌های جوشکاری شده با روش جدید، میکروساختار ناحیه‌ی اغتشاش فرم یکنواخت‌تری پیدا کرده که این امر در بهبود استحکام آن موثر می‌باشد.

۵- مراجع

[1] W. Al-Wajidi (2020). *"Analysis of friction stir welding process: sustainability and optimization"*. The University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada, 2020.

[2] Mohammad Syahid Mohd Isa, Kaveh Moghadasi, Mohammad Ashraf Ariffin, Sufian Raja, Mohd Ridha bin Muhamad, Farazila Yusof, Mohd Fadzil Jamaludin, Nukman bin Yusoff, Mohd Sayuti bin Ab Karim (2021). *"Recent research progress in friction stir welding of aluminium and copper dissimilar joint: a review"*. *Journal of materials research and technology*, vol. 15, November – December 2021, pp. 2735-2780.

[3] A. Tamadon, Keerthy Chakradhar D.S., Pons D.J., M.K. Sued, Clucas D., Wong E.W. (2016*). "Analogue modeling of bobbin tool friction stir welding". International conference on innovative design and manufacturing (ICIDM)*, Auckland, New Zealand.

[4] M. Ilangovan, S. Rajendra Boopathy, V. Balasubramanian (2015). *"Effect of tool pin profile on microstructure and tensile properties of friction stir welded dissimilar AA6061-AA5086 Aluminium alloy joints". Defense Technology*, vol. 11, Issue 2, June 2015, pp. 174-184.

[5] D. Devaiah, K. Kishore, P. Laxminarayana (2017). *"Effect of welding speed on mechanical properties of dissimilar friction stir welded AA5083-H321 and AA6061-T6 Aluminum alloys". International journal of advanced engineering research and science (IJAERS)*, vol. 4, issue 3, March 2017.

[6] P. Hema, K. Sai Kumar naik, K. Ravindranath (2017). *"Prediction of effect of process parameters on friction stir welded joints of dissimilar Aluminum alloy AA2014 and AA6061 using taper pin profile". Materials Today*, processing 4, pp. 2174-2183.

[7] B.T. Ogunsemi, T.E. Abioye, T.I. Ogedengbe, H. Zuhailawati (2021*). "A review of various improvement strategies for joint quality of AA6061-T6 friction stir weldments". Journal of Materials Research and Technology*, vol. 11, pp. 1061-1089.

[8] Shuai Tan, Feiyan Zheng, Juan Chen, Jingyu Han, Yujuan Wu, Liming Peng (2017). *"Effects of process parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir lap linear welded 6061 aluminum alloy to NZ30K magnesium alloy". Journal of Magnesium and alloy* 5, pp. 56-63.

[9] J. Stephen Leon1 and Dr. V. Jayakumar, *"Investigation of Mechanical Properties of Aluminium 6061 Alloy Friction Stir Welding", International Journal of Students' Research in Technology & Management* Vol 2 (04), June-July 2014, ISSN 2321-2543, pg 140-144,(2014).

1 J.Stephen Leon
2 F. C. LIU

[10] F.C. LIU and Z.Y. MA, *"Influence of Tool Dimension and Welding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Friction-Stir-Welded 6061-T651 Aluminum Alloy", The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International* 2008.