ماەنامە علمى پژوھشى

مهندسی ساخت و تولید ایران www.smeir.org

ارزیابی استفاده از ابزار دوکی شکل شناور برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه آلومینیم

محمد على نظيرى ، امين ربيعى زاده **

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران ۲- استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران * شیراز، صندوق پستی ۲۷۸۷۷۲۴۷۲۱، rabieezadeh@iaushiraz.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیدہ
مقاله پژوهشی کامل دریافت: ۲۱ تیر ۱۳۹۸ پذیرش: ۱۳ مهر ۱۳۹۸ ارائه در سایت: خرداد ۱۳۹۹	جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی، جایگزین مناسب روش جوش کاری با قوس – الکترود فلزی با گاز محافظ برای اتصال آلیاژهای آلومینیم در صنایع هوافضا و کشتی سازی است. اخیرا روش جدیدی از جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی با عنوان جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار دوکی شکل شناور معرفی شده است که اجرای این فرایند را با نیروی عمودی تقریبا صفر ممکن میسازد. از دیگر مزایای این روش، میتوان به جوش کاری دو طرفه همزمان و تقارن ناحیه اغتشاش در امتداد ضخامت اشاره کرد. تمرکز اصلی این مقاله بر استفاده از
کلیدواژگان: آلومینیم خالمی تجاری جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی اتال دو طرفه ابزار دوکی شکل خواص مکانیکی	تکنولوژی جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه با ابزار دوکی شکل شناور برای اتصال آلومینیم خالص تجاری است. ابزار مورد استفاده در این فرایند از جنس فولاد گرم کار با سختی ۵۲ HRc است که دارای دو شانه و یک پین استوانهای رزوهدار است. پس از اجرای فرایند جوش کاری، به منظور ارزیابی کیفیت اتصال، آزمونهای غیرمخرب و مخرب بر روی نمونه جوش کاری شده انجام شد. آزمونهای غیرمخرب بی عیب بودن نمونه جوش کاری شده با پارامترهای بهینه را تایید کردند. نتایج آزمون کشش نشان داد که راندمان اتصال بسیار چشمگیر و در حدود ۸۰ ٪ بدست آمده است. علاوه بر استحکام کششی مطلوب، کرنش شکست نمونه جوش کاری شده در مقایسه با کرنش شکست فلز پایه رشد ۸۰ ٪ داشته است. بدین ترتیب، توسعه و بهرهبرداری از این روش پتانسیل اولیه برای گسترش روشی ارزان قیمت، حالت جامد و قابل اعتماد را فراهم می کند. در عین حال بر پایه این روش میتوان تجهیزاتی با هزینه اولیه کم، برای اجرای

Assessment of using the floating bobbin tool for double sided friction stir welding of aluminium

Mohammad Ali Naziri, Amin Rabiezadeh*

Department of Materials Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran * P.O.B. 7178774731 Shiraz, Iran, rabieezadeh@iaushiraz.ac.ir

Article Information	Abstract
Original Research Paper Received 12 July 2019 Accepted 5 October 2019 Available June 2020	The friction stir welding is a suitable substitute for gas metal arc welding for joining aluminum alloys in aerospace and shipbuilding industries. Recently a new friction stir welding method named floating bobbin tool friction stir welding has been introduced, that enables the implementation of this process with almost zero vertical force. Another advantage of this technique is the simultaneous double sided welding and the
Keywords: CP- Aluminum Friction stir welding Double sided joining Bobbin tool Mechanical properties	symmetry of the stirred region along the thickness. This paper focuses on the use of double sided friction stir welding technology with a floating bobbin tool for joining commercial pure aluminum. The tool used in this process was made from hot working steel with a hardness of 52 HR _c . This tool has two shoulders and a threaded cylindrical pin. After performing the welding process, in order to assess the quality of the connection, non-destructive tests of visual inspection, radiography, as well as destructive tests of tensile, bending, hardness and metallography performed on a welded sample. Non-destructive tests confirmed the perfection of a welded sample with optimal parameters. The results of the tensile test showed that joint efficiency was highly significant and reached about 80%. In addition, the fracture strain of the welded sample was 80% higher than that of the base metal. Accordingly, the development and exploitation of this method provides the potential for the development of a low cost, solid state and reliable technology, and the feasibility of designing inexpensive equipment for mobile friction stir welding.

استحکام و مقاومت به خوردگی دارای کاربردهای روز افزونی	۱– مقدمه
هستند. در سراسر جهان آلومینیم به صورت گستردهای در	آلومینیم و آلیاژهای آن به دلیل خواص مطلوبی نظیر سبکی،

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. A. Naziri, A. Rabiezadeh, Assessment of using the floating bobbin tool for double sided friction stir welding of aluminium, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 52-62, 2020 (in Persian)





محمد علی نظیری، امین ربیعی زادہ



(b) BTFSW

 Fig. 1 Schematic illustration of friction stir welding with; a. simple tool, b. bobbin tool [7]

 شکل ۱ طرحواره جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی با ؛ الف. ابزار ساده؛ و ب.

 ابزار دوکی شکل [۷]

در خصوص استفاده از روش ابزار دوکی شکل برای اتصال مواد، عمده بررسیها بر روی کیفیت اتصال، خواص مکانیکی، ریزساختار، شرایط بهینه و شبیه سازی فرایند محدود به آلیاژهای آلومینیم سری 6xxx از قبیل 6005، 6066، 6066 و 6080 است [۷، ۱۳–۲۲]. در این بین تا کنون تنها یک مورد از اجرای این روش بر آلومینیم خالص تجاری سری 1xxx (1100) گزارش شده است که به بررسی و امکان سنجی استفاده و اجرای این روش در فضا پرداخته است [۲۳].

مشاهده می شود که جوش های ایجاد شده با استفاده از ابزار دوکی شکل از ظاهر مطلوبی برخوردار بوده و در عین حال عیوب جوش کاری درونی آن ها نیز حذف یا به حداقل رسیده است. یکی از دلایل این امر وجود دو شانه شامل شانه بالایی و شانه پایینی ابزار است. این عامل باعث کاهش نیروهای مورد نیاز جهت ثابت نگهداشتن قطعه کار و همچنین تأمین میزان حرارت مورد نیاز جهت اغتشاش و مخلوط شدن مواد در ناحیه جوش، می شود [۱۰، ۲۴، ۲۵]. معایب و یا دیدگاههای کاربردی به اندازه می شود [۱۰، ۲۴، ۲۵]. معایب و یا دیدگاههای کاربردی به اندازه می شود. از این روش جوش کاری مورد بحث قرار نگرفته اند لذا می شود. از این رو در این پژوهش اتصال همجنس آلومینیم خالص تجاری از دسته آلیاژهای آلومینیم سری 1xxx (1050) با استفاده از ابزار دوکی شکل شناور مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. در این راستا ابزار دوکی شکل شناور طراحی و ساخته صنایع کشتی سازی و هوافضا مورد استفاده قرار می گیرد [۱، ۲]. روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی مزایای بسیاری را ارائه می دهد: ۱. اعوجاج کم و ظاهر مطلوب – از این رو با عدم نیاز به فرایندهای پس از جوش کاری، نظیر حذف سرباره و تسطیح مجدد قطعه، سبب کاهش هزینه می شود؛ ۲. کاربر پسند و زیست سازگار – عاری از هرگونه دود و تشعشع ماوارء بفنش؛ ۳. حذف عیوب موجود در روش های جوش کاری ذوبی معمول – ترک گرم، تخلخل، ذوب ناقص)؛ ۴. توانایی جوش کاری در همه جهات و وضعیتها (از آنجایی که روش غیرذوبی است، متاثر از نیروی جاذبه نمی باشد) [۳–۵]. با گذشت پنج سال از پیدایش روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی در سال ۱۹۹۱، این روش به عنوان روش ساخت مناسب برای آلیاژهای آلومینیم درآمد [۶].

فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمول یا روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک طرفه با وجود همه مزایا و قابلیتهایی که در مقایسه با روشهای جوشکاری ذوبی آلیاژهای آلومینیم دارد، دارای معایبی نیز میباشد که از جمله آنها میتوان به بروز عیب و ترک در ناحیه ریشه جوش، نیاز به نیروی عمودی اعمالی زیاد و سرعت کم جوشکاری اشاره نمود. نیاز به نیروی عمودی بسیار زیاد در حین جوشکاری اشاره نمود. مکان دقیق ابزار است که برای اجرای این روش به دستگاههای بزرگ، سنگین و گرانقیمتی نیاز است. کاهش نیروهای لازم برای اجرای فرایند به خصوص نیروی عمودی، یکی از نیازهای کلیدی برای طراحی دستگاه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی متحرک میباشد. یکی از گزینههای پیشنهادی برای کاهش نیروی عمودی این فرایند، استفاده از روش ابزار دوکی شکل با

از مزایای استفاده از این ابزار بی همتا میتوان به حذف نیروی عمودی، نفوذ کامل جوش و حذف صفحه پشتیبان از قید و بست جوشکاری اشاره کرد. علاوه بر این با استفاده از ابزار دوکی شکل شناور، بجای ابزار دوکی شکل ثابت، امکان جابجایی آزادانه ابزار را در راستای عمود بر قطعه فراهم میکند. از این رو ابزار دوکی شکل شناور با حرکت آزادانه خود در راستای عمود بر سطح قطعه، مکانی با کمترین مقاومت در حین جوشکاری را با متعادل کردن نیروهای وارد شده بر هر یک از شانهها پیدا میکند که منجر به کاهش نیروهای فرایند شده و کنترل بسیار سادهای از جانب دستگاه جوشکاری نیاز خواهد داشت. این روش "جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار دوکی شکل شناور" نامیده میشود [۸–۱۲].

شد. پس از آن فرایند جوش کاری اصطکای اغتشاشی با این ابزار بر روی ورق آلومینیم خالص تجاری 1050 اجرا گردید. قطعات جوش کاری شده به منظور ارزیابی کیفیت و راندمان اتصال، توسط بازرسی چشمی، رادیوگرافی و آزمونهای کشش، سختی سنجی، خمش و متالوگرافی مورد بررسی قرار گرفتند.

۲- روش تحقیق

فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار دوکی شکل بر روی قطعاتی از جنس آلومینیم خالص تجاری AA 1050-H16 صورت گرفت. آنالیز کوانتومتری به منظور تعیین جنس نمونهها انجام شد (جدول ۱). نمونهها از ورقی با ضخامت ۵ میلیمتر با ابعاد ۱۰۰ در ۲۰۰ میلیمتر تهیه شد. جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نمونهها در حالت لب به لب انجام شد. به منظور ساخت ابزار دوکی شکل شناور از فولاد گرمکار H13 که تا ۲±۵۰ راکول سی سخت کاری شده، استفاده شد.

تصویر ابزار دوکی شکل شناور ساخته شده برای اجرای این پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است. در این شکل قطعات تشکیل دهنده ابزار قابل مشاهده است که عبارتند از: ۱. بدنه ابزار؛ ۲. محدود کننده شناوری؛ ۳. میله شناور؛ ۴. شانه بالایی ابزار؛ ۵. پین؛ ۶. شانه پایینی ابزار. به علت ماهیت این نوع جوش کاری که به جوش کاری دوطرفه نیز شهرت دارد، از دو شانه استفاده می شود که یکی وظیفه ایجاد اصطکاک و هدایت مواد خمیری را بر روی سطح بالایی قطعه و دیگری بر روی

سطح زیرین قطعه، بر عهده دارد. تنها تفاوت این دو شانه که می ایست در طراحی لحاظ گردد؛ بحث انتقال حرارت است. به علت ارتباط بیشتر شانه بالایی با ابزار و وجود سطح بیشتر جهت انتقال حرارت بهتر، می ایست بر روی شانه پایینی ابزار می توان از طراحی گردد. با ایجاد گرمابر بر روی شانه پایینی ابزار می توان از افزایش بیش ازحد دما در سطح زیرین قطعه کار جلوگیری نمود. برای اتصال همجنس آلومینیم 1050-116 از ابزاری با پین استوانه ای رزوه دار با قطر ۶ میلی متر و شانه هایی با قطر ۲۳ میلی متر استفاده شد.

فرایند جوش کاری با استفاده از دستگاه فرز عمودی (مدل (M3) انجام شد. با توجه به پیشینه تحقیق و بررسیهای تجربی به عمل آمده، سرعت چرخشی ۵۶۰ دور بر دقیقه و همچنین سرعت پیشروی ۲۸ میلیمتر بر دقیقه بهعنوان مقادیر ورودی در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است با توجه به محدود بودن پژوهشهای پیشین میبایست ابتدا مقدار مناسب مشخص و سپس بهعنوان ورودی در نظر گرفته میشد. لذا چندین سرعت چرخشی و همچنین سرعت پیشروی مورد بررسی قرار گرفت و عنوان پارامترهای اتصال همجنس موفق آلومینیم خالص تجاری انتخاب گردید (جدول ۲). برای اطمینان از سلامت جوش و عاری از عیب بودن آن، آزمونهای غیرمخرب بازرسی چشمی و پرتونگاری با استفاده از اشعه ایکس بر روی نمونهها انجام شد.

Table 1 Che	mical composi	tion of comme	ercial pure alun	ninum used in t	his research				
Ni	Cr	Zn	Mg	Mn	Cu	Fe	Si	Al	
•/•17	<•/•• \	•/• ٢ •	•/•• \	<•/•• \	۰/۰۰۵	•/77۶	۰/۰۹۴	۹٩/۵	AA 1050
Cd	Ga	В	Bi	V	Sn	Pb	Ca	Ti	
• / • • ١	۰/۰۱۳	•/••٢	$< \cdot / \cdot \cdot \Delta$	•/• \ •	•/• \ •	<•/••۲	•/••1	۰/۰ ۱۶	

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلومینیم خالص تجاری استفاده شده در این پژوهش

جدول ۲ نتایج بررسی های متفاوت سرعت چرخش، سرعت پیشروی و فاصله بین شانه ها

توضيحات	كيفيت ظاهري	فاصله بين شانهها	سرعت پیشروی	سرعت چرخش	مادہ	رديف
	اتصال	(mm)	ابزار (mm/min)	(rpm)		
عدم اتصال بدليل سيلان نامطلوب ماده	نامناسب	۴/۹	۶.	٩٠٠	AA 1050	1
عدم اتصال بدليل سيلان نامطلوب ماده	نامناسب	۴/۹	۴۵	٩٠٠	AA 1050	2
عدم اتصال بدلیل عدم اختلاط کافی	نامناسب	۴/۷	۴۵	۷۱۰	AA 1050	3
اتصال ناقص، نفوذ ناکافی در پشت قطعه	نامناسب	۴/۷	۴۵	56.	AA 1050	4
اتصال ناقص، نفوذ ناکافی در پشت قطعه	نامناسب	۴/۷	۲۸	56.	AA 1050	5
	مناسب	۴/۵	۲۸	۵۶۰	AA 1050	6



(الف)



Fig. 2 a. Floating bobbin tool, b. welding set up شکل ۲ الف. ابزار دوکی شکل شناور؛ و ب. چیدمان ابزار و قطعه برای جوش کاری

به منظور بررسیهای ریزساختاری آمادهسازی نمونهها با

استفاده از سمبادههای ۴۰۰ تا ۲۰۰۰ انجام شد. حکاکی نمونهها توسط محلولی با ترکیب ۱۲ میلی لیتر HNO₃ ۵ میلی لیتر HNO₃، ۱ میلی لیتر آب و ۱ میلی لیتر HF به مدت ۱۰ ثانیه انجام شد. پس از آمادهسازی، نمونهها بهمنظور بررسی ریزساختاری، با استفاده از میکروسکپ نوری مورد تصویربرداری قرار گرفتند. خواص مکانیکی نمونهها از طریق آزمونهای کشش، خمش و سختی ارزیابی شد. آزمون استحکام کششی با استفاده از دستگاه كشش universal مطابق با استاندارد ASTM E8-M انجام شد. سرعت فک دستگاه در این آزمون mm/min 2 انتخاب گردید. برای تعیین استحکام خمشی نمونهها، آزمون خمش سه نقطهای بر اساس استاندارد ASME Sec. IX با استفاده از دستگاه یونیورسال ۲ تن بر روی نمونه ها انجام شد. سختی نمونهها از طريق آزمون ريزسختي ويكرز وبا استفاده از دستگاه سختي سنج مدل DHV-1000 تعیین گردید. در این آزمون از نمونههای تهیه شده در مرحله متالوگرافی که دارای صافی سطح مناسبی بودند استفاده شده است. به منظور تعيين پروفيل سختي ناحيه اتصال، سختی سنجی بر روی مقطع عرضی انجام شد. برای این کار، میزان نیروی وارده و مدت زمان اعمال نیرو توسط دستگاه به ترتيب ۱ كيلوگرم و ۱۵ ثانيه انتخاب شد.

۳- نتايج و بحث

ابتداییترین روش ارزیابی نمونههای فرآوری شده، بازرسی چشمی است که از طریق آن میتوان به بسیاری از عیوب ظاهری نمونهها پی برد. لذا قبل از نمونهبرداری جهت آزمونهای مکانیکی، نمونههای جوش کاری شده مورد بازرسی چشمی قرار گرفتند. در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار دوکی شکل، بهدلیل وجو دو شانه در دو طرف کار، هر دو سطح کار ظاهری شبیه به قطعه جوش کاری شده به روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی یک طرفه دارد. با توجه به تغییر پارامترهای جوشکاری جهت بدست آوردن اتصالی سالم با استفاده از روش ابزار دوکی شکل شناور، موفقیت ظاهری فرایند با استفاده از بازرسی چشمی قابل تشخیص میباشد. در شکلهای ۳- الف و ب تصاویر رو و پشت نمونه جوش کاری شده موفق با ظاهری بی نقص قابل مشاهده است. به همین ترتیب در شکلهای 3 ج و د، تصاویر اتصال ناموفق که دارای عیب عدم پرشدگی در پشت جوش است، دیده می شود. عیب عدم پرشدگی در پشت جوش ناشی از سیلان نامطلوب مواد در آن ناحیه است که می توان با تغییر طراحی شانه پایینی، افزایش سرعت چرخش ابزار، کاهش سرعت پیشروی و تا حدودی با كاهش فاصله بين شانهها آن را برطرف كرد.

محمد علی نظیری، امین ربیعی زادہ



Fig. 3 Image of sound welded sample by tool transverse speed of 28 mm/min and tool rotational speed of 560 rpm: a. weld face and b. weld root; image of welded sample by 45 mm/min and 560 rpm witch has a long un-filling in the bottom of the weld: c. weld face and d. weld root شکل ۳ تصویر نمونه جوش کاری شده مطلوب با سرعت پیشروی ۲۸ mm/min و سرعت چرخش ۶۰۰ rpm: الف. روی جوش و ب. پشت جوش؛ تصویر نمونه جوش کاری شده با سرعت پیشروی ۴۵ mm/min و سرعت چرخش ۵۶۰ rpm که دارای عیب عدم پر شدگی در پشت جوش است: ج. روی جوش و د. پشت جوش

در نمونه 2 سرعت پیشروی ابزار کاسته شد که در این حالت حرارت قطعه به حدی افزایش یافت که نمونه بیش از حد خمیری شد و امکان سیلان مطلوب آن وجود نداشت و بجای پیشروی ابزار در میان قطعه و اتصال آنها، سبب پارگی قطعه شد. برای حذف این معضل در نمونه 3 سرعت چرخش ابزار به شد. برای حذف این معضل در نمونه 3 سرعت چرخش ابزار به محینان به دلیل سیلان زیاد و شاید کم بودن نیروی آهنگری، ممچنان به دلیل سیلان زیاد و شاید کم بودن نیروی آهنگری، حفره تونلی در پشت قطعه مشاهده شد. کاهش سرعت چرخش ابزار، سرعت پیشروی ابزار و فاصله بین شانهها به همین ترتیب ادامه پیدا کرد تا اتصال مطلوب و بدون عیب ظاهری در سرعت در پژوهش حاضر با تغییر سه متغیر سرعت چرخش ابزار، سرعت پیشروی ابزار و فاصله بین شانهها، اتصال قابل قبولی ایجاد شد. در نمونه شماره ۱، سرعت پیشروی ابزار به حدی زیاد بود که مانع از گرم شدن قطعه و لذا سیلان مطلوب آن میشد. از طرفی فاصله بین شانهها در روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار دوکی شکل، معادل نیروی آهنگری در روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمول است. از این رو با افزایش فاصله بین شانهها (یعنی کاهش نیروی آهنگری)، امکان افزایش فاصله بین شانهها (یعنی کاهش نیروی آهنگری)، امکان تشکیل عیب عدم پر شدگی و یا حفره تونلی وجود دارد که در نمونه ۱ نیز مشاهده گردید. به منظور برطرف کردن معایب فوق،







(ج)

Fig. 5 Engineering stress-strain curve of base metal and welded sample; b. image of fractured samples after tensile test and c. SEM image of fracture surface of welded sample.

شکل ۵ الف. نمودار تنش کرنش مهندسی فلز پایه و قطعه جوشکاری شده؛ ب. تصاویر قطعات شکسته شده بعد از آزمون کشش و ج. تصویر میکروسکپ الکترونی سطح شکست قطعه جوشکاری شده.

در خصوص اتصال این آلیاژ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار دوکی شکل شناور پژوهشی صورت نگرفته است اما اتصال این آلیاژ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمول توسط معدود پژوهشگرانی بررسی شده است که نتایج آن در جدول ۴ ارائه گردیده است. پیشروی ۲۸ mm/min، سرعت چرخش ۵۶۰ ۲۶۳ و فاصله بین شانههای ۴/۵ mm بدست آمد.

پس از دستیابی به اتصالی با کیفیت ظاهری مطلوب، به منظور ارزیابی سلامت قطعی و عاری بودن از عیوب درونی، آزمون پرتونگاری بر روی نمونه اجرا شد (شکل ۴). همانطور که مشاهده میشود، این نمونه فاقد هرگونه علائمی ناشی از ترک، حفره، عدم پر شدگی، نفوذ ناقص و یا هر عیب دیگری می باشد. که نشانگر اجرای موفق فرایند و بدست آمدن نمونه ای عاری از عیب است.

از تقسیم حداکثر تنش کششی نمونه جوشکاری شده بر حداکثر تنش کششی ماده پایه، راندمان اتصال بدست میآید. در برخی موارد این نسبت به شکل درصد نیز بیان میشود. این عدد میتواند بزرگتر، برابر و یا کوچکتر از ۱ باشد. راندمان اتصال معیاری برای تشخیص قدرت جوش است.

به منظور ارزیابی استحکام کششی نمونههای اتصال یافته با روش ابزار دوکی شکل شناور، آزمون کشش بر روی فلز پایه و نمونه جوشکاری شده انجام شد که نمودار تنش- کرنش، محل شکست نمونهها و نتایج آزمون به ترتیب در شکل ۵ و جدول ۳ قابل مشاهده است. همانطور که در شکل ۵- الف و جدول ۳ مشاهده میشود، استحکام کششی قطعه جوشکاری شده (۹۲/۹۳MPa) کمتر از استحکام کششی فلز پایه (۹۲/۹۳MPa) است. از این رو راندمان اتصال آلومینیم H16-1050 با استفاده از تکنیک ابزار دوکی شکل شناور ۸۰٪ است.



Fig. 4 Radiographic image of sound welded sample by 28 mm/min and 560rpm

شکل ۴ تصویر رادیوگرافی نمونه جوش کاری شده سالم با ۲۸ mm/min و ۵۶۰ rpm

جدول ۳ خواص مکانیکی فلز پایه و قطعه جوش کاری شده **Table 3** Mechanical properties of base metal and welded sample

كرنش شكست	استحكام كششى	نمونه
(%)	(MPa)	
۲.	118/08	فلز پایه
۳۶	٩٢/٩٣	نمونه جوش کاری شده

محمد علی نظیری، امین ربیعی زادہ

Table 4 Comparison of joint efficiency and fracture strain of friction stir welded samples with similar chemical composition								
مرجع	كرنش شكست	راندمان اتصال	زاويه انحراف	قطر پين	سرعت چرخش	سرعت پیشروی	ضخامت	مادہ
	(%)	(%)	ابزار (°)	(mm)	(rpm)	(mm/min)	(mm)	
[79]	۲.	٨٠	۳3	۶	۱۰۰۰	۲۰۰	۵	1050-H24
[77]	1/8	۷۴/۵	-	۴	۷۱۰	٨٠	٣	1050-O
[٢٨]	18/4	۵۰	•	۶	۱۰۰۰	۷۵	۶/۳۵	1100-H16
[٣٠ ,٢٩]	-	54/4	١	۴	18	١.	٢	1100-О
[٣١]	۲۷	۶۲/۵	٢	۶	14	362	۴	1100-H18
پژوهش حاضر	۳۶	٨٠	•	۶	۵۶۰	77	۵	1050-H16

جدول ۴ مقایسه راندمان اتصال و کرنش شکست نمونههای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده با ترکیب شیمیایی مشابه

همان طور که در جدول ۴ نشان داده شد، راندمان اتصال تکنیک ابزار دوکی شکل شناور نه تنها از روش معمول کمتر نبوده، بلکه در اغلب موارد نیز بیشتر است. نکته قابل توجه دیگر، کرنش شکست چشمگیر آن است که در مقایسه با فلز پایه ۸۰٪ افزایش داشته است. این پدیده توسط سایر محققین نیز در خصوص آلیاژهای آلومینیم جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده گزارش شده است [۲۲–۳۴].

از مزایای جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی، علاوه بر اتصال حالت جامد قطعاتی که به روشهای معمول جوش پذیر نیستند، می توان به اصلاح ریز ساختار، کاهش عیوب و بهبود چکش خواری در حالت کشش اشاره کرد. اجرای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی سبب تغییر شکل پلاستیک شدید ماده نیز می شود که با وجود حرارت اصطکاکی ایجاد شده، تبلور مجدد دینامیک پیوسته رخ داده که منجر به تشکیل ریزساختار ریزدانه با دانه بندی یکنواخت می شود [۳۵، ۳۶]. در تعریف سوپرپلاستیسیته افزایش کرنش شکست به میزان حداقل ۲۰۰٪ آمده است. لازم به ذكر است كه يكى از ملزومات اوليه پديده سوپرپلاستيسيته، ساختار ریزدانه، به طور معمول کمتر از ۱۵ µm می باشد. علاوه بر این هرچه اندازه دانه ریزتر باشد، نرخ کرنش لازم برای سوپرپلاستیسیته، زمانی که لغزش مرزدانهای غالب باشد، افزایش می یابد. از دیگر شرایط لازم برای سوپر پلاستیسیته می توان به عدم تطابق بالای مرزدانهها و یا به عبارت دیگر وجود مرزدانههای بزرگ زاویه در ریزساختار، هممحور بودن دانهها و تحرک بالای مرزدانهها اشاره کرد [۳۸، ۳۷]. نکته قابل توجه این است که همگی این شرایط در نتیجه جوشکاری/فرآوری اصطکاکی اغتشاشی فراهم می گردد [۳۹]. در این پژوهش میزان کرنش شکست نمونه جوشکاری شده افزایش زیادی (۸۰٪) نسبت به فلز پایه دارد، که در تعریف سوپرپلاستیسیته قرار نمی گیرد، اما برقراری شرایط گفته شده سبب شده که در یک نرخ کرنش معمول برای آزمون کشش و در دمای محیط، چنین

افزایشی در کرنش شکست دیده شود.

در شکل ۵- ب، تصویر نمونههای شکسته شده پس از آزمون کشش دیده می شود. نمونه فلز پایه قبل از شکست دچار گلویی شدن شده و سپس از محل گلویی شدن دچار شکست شده که نشانه مکانیزم شکست نرم است. دیده می شود که نمونه جوش کاری شده دارای طول نهایی بیشتری نسبت به نمونه فلز پایه است که کرنش شکست بیشتر قطعه جوشکاری شده را تایید میکند. نمونه جوشکاری شده نیز همانند فلز پایه قبل از شکست نهایی دچار گلویی شدن شده است که نشان دهنده مکانیزم شکست نرم است. نمونه جوشکاری شده از ناحیه اغتشاش دچار شکست شده است. علاوه بر آن شکست قطعه در راستای ۴۵ درجه نسبت به محور اعمال نیرو می باشد که بر اساس قانون اشميد، نشان دهنده فعال شدن مكانيزم لغزش است و موید شکست قطعه جوش کاری شده با مکانیزم شکست نرم می اشد. در شکل ۵- ج، تصویر میکروسکپ الکترونی سطح شکست قطعه جوشکاری شده نشان داده شده است. برای مشاهده بهتر مشخصات سطح شكست، تصوير ميكروسكپ الكتروني در حالت الكترونهاي ثانويه گرفته شده تا پستي و بلندیهای سطح به خوبی نمایان شود. در تصویر دیمپلهای به نسبت ریزی مشاهده می شود که مشخصه اصلی شکست نرم می باشد. در شکست نرم در ناحیه گلویی ابتدا حفرههایی جوانه می زند و سپس این حفرهها به هم می پیوندند و ترک ایجاد می شود. با تکرار این عملیات (جوانه زنی حفره ها و پیوستن آنها به ترک) ترک رشد کرده و پس از رسیدن به طول بحرانی به سرعت رشد کرده و باعث شکست نهایی می شود. لذا سطح شکست نرم متشکل از حفرههایی است که برای تشکیل ترک از میان به دو قسمت درآمدهاند؛ به عبارت دیگر سطح شکست شامل تعداد زیادی نیم حفره است که به آنها دیمپل گفته می شود. از این رو مشاهده دیمپلها در سطح شکست قطعه نشان دهنده حاکم بودن مکانیزم شکست نرم است.

ارزیابی استفاده از ابزار دوکی شکل شناور برای جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه آلومینیم

محمد علی نظیری، امین ربیعی زادہ



(ج) Fig. 7 a. Transverse cross sectional macrostructure of welded sample; b. microstructure of stirred zone and c. microstructure of HAZ. شکل ۷ الف. درشت ساختار سطح مقطع عرضی جوشکاری شده؛ ب. ریزساختار ناحیه اغتشاش و ج. ریزساختار ناحیه متاثر از حرارت.

نتایج میکروسختی سنجی در امتداد سطح مقطع عرضی ناحیه جوشکاری شده در شکل ۸ مشاهده میشود. بررسی نمودار سختی میتواند تغییرات خواص مکانیکی در منطقه اغتشاش را نمایان کند. با اندازه گیری سختی میتوان برآوردی از چگونگی توزیع اندازه دانهها را به دست آورد. تغییرات سختی در امتداد ناحیه اتصال به طور عمده به میزان نرم شدگی در نتیجه حرارت ایجاد شده در حین فرایند و تغییرفرم پلاستیک در نتیجه اغتشاش مواد بستگی دارد. به منظور ارزیابی کیفی اتصال جوش کاری و بررسی وجود یا عدم وجود عیوب در آن، آزمون خمش بر روی نمونه جوش کاری شده انجام شد که نتیجه آن در شکل ۶ دیده می شود.

مشاهده می شود که بعد از آزمون خمش نمونه دچار شکست نشده است و ناحیه اتصال چکش خواری بالایی از خود نشان داده است. مجموعه این مشاهدات موید سلامت قطعه جوش کاری شده و عاری از عیب بودن آن است.

درشت ساختار سطح مقطع جوش کاری اصطکاکی شده با ابزار دوکی شکل شناور در شکل ۷- الف نشان داده شده است. پهنای ناحیه تغییرشکل داده در بالا و پایین بیشتر از میانه آن می باشد. در این ناحیهها به دلیل تماس شانههای ابزار با سطوح بالایی و پایینی، گسترش ناحیه اغتشاش بیشتر است. بدین ترتیب، بر خلاف ناحیه اغتشاش در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به روش معمول، تقارن ساختاری بیشتری در امتداد ضخامت قطعه مشاهده می شود که منجر به یکنواختی بیشتر خواص مكانيكي قطعه در امتداد ضخامت مي شود. ناحيه مياني که تحت تاثیر تغییرفرم پلاستیک شدید قرار گرفته است و در معرض حرارت ناشی از اصطکاک ابزار با قطعه قرار دارد. از این رو دچار تبلورمجدد دینامیکی پیوسته شده و لذا ساختاری ریزدانه با دانههای هم محوری که عدم تطابق بالایی با یکدیگر دارند، دارد [۴۰-۴۳]. همان طور که انتظار میرود در ناحیه اغتشاش نمونه جوش کاری شده نیز ساختاری فوق ریزدانه با دانههای هم محور تشکیل شده است که در شکل ۷- ب قابل مشاهده است. در شکل ۷- ج تصویر ریزساختار ناحیه متاثر از حرارت مشاهده می شود که به دلیل افزایش دما و رشد دانهها در این ناحیه، ساختار درشت دانهای در مقایسه با ناحیه اغتشاش بوجود مي آيد.



Fig. 6 Image of the welded sample after bending test. شکل ۶ تصویر نمونه جوش کاری شده بعد از آزمون خمش.



Fig. 8 Microhardness profile through transverse cross section of weld شکل ۸ پروفیل ریزسختی در امتداد سطح مقطع عرضی جوش.

بر اساس رابطه هال-پچ ما بین اندازه دانه و سختی در ناحیه اغتشاش، نواحی درشت دانه از سختی پایین تری برخوردار بوده و نواحی ریزدانه سختی بالاتری از خود نشان میدهند.

سختی نمونه خام (HV) ۳۷ که ناشی از کار سختی صورت گرفته در حین عملیات نورد اولیه ماده میباشد. کار سختی ناشی از عملیات نورد، به طور عمده سبب افزایش چگالی نابجاییها در ورقشده و باعث افزایش سختی آن میگردد. اما تبلور مجدد دینامیک پیوسته که در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی رخ می دهد باعث کاهش چگالی نابجاییها در ناحیه اغتشاش میشود. که بیانگر این است که اثر کار سختی بعد از بروز پدیده تبلور مجدد از بین رفته است. لذا همان طور که در پروفیل ریزسختی مشاهده میشود، ناحیه اغتشاش دچار نرم شدگی میشود.

مطابق معادله هال – پچ با ریز شدن دانه در ناحیه اغتشاش یافته، سختی این ناحیه باید افزایش یابد. از طرفی بر اساس پدیده تبلور مجدد، دانههای جدید عاری از کرنش و با چگالی نابجایی پایینی که تولید میشوند، سختی کمتری از خود نشان میدهند. این پدیده که توسط سایر محققان نیز گزارش شده است؛ بیان میکند که میزان افزایش سختی ناشی از ریزدانه شدن کمتر از میزان کاهش سختی ناشی از کاهش چگالی نابجاییها در دانه های عاری از کرنش تبلور مجدد یافته است اغتشاشی، سختی ناحیه اغتشاش کاهش مییابد.

۴- نتیجهگیری

در این پژوهش، آلومینیم خالص تجاری H16-1050 با استفاده از روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار دوکی شکل شناور اتصال داده شد و کیفیت اتصال با استفاده از آزمونهای غیرمخرب و مخرب ارزیابی گردید. همچنین به منظور درک

بیشتر خواص مکانیکی ناحیه اتصال، بررسیهای ریزساختاری نیز انجام شد. خلاصه مهمترین و اصلیترین نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:

- جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه آلومینیم خالص تجاری AA1050-H14 با ابزار دوکی شکل با موفقیت انجام شد. در این حالت سرعت پیشروی، سرعت چرخش ابزار و فاصله بین شانهها به ترتیب ۲۸mm/min ۵۶۰rpm و ۲۸mm/

- بازرسی چشمی و انجام آزمون رادیوگرافی بر روی نمونه جوش کاری شده آلومینیم خالص تجاری H14-AA1050 نیز صحت قطعه را تأیید نمود. علاوه بر این با مقطع زنی بر روی نمونه و بررسیهای ماکروگرافی، هیچگونه عیبی مشاهده نشد که تاییدی بر انتخاب صحیح پارامترهای جوش کاری است.

- استحکام جوش همجنس دو طرفه بدست آمده بر اساس آزمون کشش، ۸۰٪ استحکام فلز پایه بود. همچنین این نمونه آزمون خمش را با موفقیت گذراند و در انتهای آزمون هیچگونه آثاری از ترک یا گسیختگی در نمونه مشاهده نشد که بیانگر چکش خواری بالای ناحیه اتصال میباشد.

- میزان داکتیلیته جوش بر اساس نتایج آزمون کشش به عمل آمده در حدود ۲ برابر فلز پایه بوده که حاکی از تشکیل ساختار فوق ریزدانه و دانههای هم محور با عدم تطابق بالا در ناحیه اغتشاش میباشد.

- پروفیل سختی بدست آمده، افت سختی در ناحیه جوش را نشان میدهد که در نتیجه کاهش چگالی نابجاییها در دانههای تبلور مجدد دینامیکی یافته است.

- استفاده از تکنیک ابزار دوکی شکل شناور، علاوه بر راندمان مطلوب اتصال و کرنش شکست بالا به جهت طراحی ابزار منحصر بفرد آن حائز اهمیت است. این طراحی سبب اطمینان از نفوذ کامل جوش در راستای ضخامت و کاهش نیروهای وارد شده به دستگاه می شود. به نحوی که استفاده از این تکنیک و حذف نیروهای لازم در راستای عمود بر قطعه، می تواند گزینه مناسبی برای طراحی و ساخت دستگاه جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی متحرک باشد.

۵- مراجع

 P. Rambabu, N. Eswara Prasad, V. V. Kutumbarao, and R. J. H. Wanhill, "Aluminium Alloys for Aerospace Applications," in *Aerospace Materials* and Material Technologies : Volume 1: Aerospace Materials, N. E. Prasad and R. J. H. Wanhill, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2017, pp. 29-52. Corrosion Science, Vol. 111, pp. 98-109, 2016.

- [15] J. C. Hou, H. J. Liu, and Y. Q. Zhao, "Influences of rotation speed on microstructures and mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy joints fabricated by self-reacting friction stir welding tool," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 73, No. 5-8, pp. 1073-1079, 2014.
- [16] H. J. Liu, J. C. Hou, and H. Guo, "Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy," *Materials & Design*, Vol. 50, pp. 872-878, 2013.
- [17] L. Zhou *et al.*, "Microstructural characteristics and mechanical properties of Al–Mg–Si alloy selfreacting friction stir welded joints," *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 22, No. 5, pp. 438-445, 2016.
- [18] K. Okamoto, A. Sato, S. H. C. Park, and S. Hirano, "Microstructure and Mechanical Properties of FSWed Aluminum Extrusion with Bobbin Tools," *Materials Science Forum*, Vol. 706-709, pp. 990-995, 2012.
- [19] A. Węglowska, "The Use of a Bobbin Tool in the Friction Stir Welding of Plates Made of Aluminium Alloy EN AW 6082 –T6," *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, Vol. 2018, No. 5, pp. 35-43, 2018.
- [20] M. K. Sued and D. J. Pons, "Dynamic Interaction between Machine, Tool, and Substrate in Bobbin Friction Stir Welding," *International Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2016, pp. 1-14, 2016.
- [21] Y. Huang, L. Wan, T. Huang, Z. Lv, L. Zhou, and J. Feng, "The weld formation of self-support friction stir welds for aluminum hollow extrusion," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 87, No. 1-4, pp. 1067-1075, 2016.
- [22] Y. X. Huang, L. Wan, Z. L. Lv, S. X. Lv, L. Zhou, and J. C. Feng, "Microstructure and microhardness of aluminium alloy friction stir welds with heat treatment," *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 21, No. 8, pp. 638-644, 2016.
- [23] W. R. Longhurst *et al.*, "Development of friction stir welding technologies for in-space manufacturing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 90, No. 1-4, pp. 81-91, 2016.
- [24] M. Esmaily *et al.*, "Bobbin and conventional friction stir welding of thick extruded AA6005-T6 profiles," *Materials & Design*, Vol. 108, pp. 114-125, 2016.
- [25] J. Chen, H. Fujii, Y. Sun, Y. Morisada, and K. Kondoh, "Optimization of mechanical properties of fine-grained non-combustive magnesium alloy joint by asymmetrical double-sided friction stir welding," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 242, pp. 117-125, 2017.
- [26] H. J. Liu, H. Fujii, M. Maeda, and K. Nogi, "Mechanical properties of friction stir welded joints of 1050 – H24 aluminium alloy," *Science and*

- [2] P. Wang, X. Chen, Q. Pan, B. Madigan, and J. Long, "Laser welding dissimilar materials of aluminum to steel: an overview," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 87, No. 9-12, pp. 3081-3090, 2016.
- [3] R. S. Mishra, P. S. De, and N. Kumar, "Introduction," in *Friction Stir Welding and Processing: Science and Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 1-11.
- [4] G. K. Padhy, C. S. Wu, and S. Gao, "Friction stir based welding and processing technologies processes, parameters, microstructures and applications: A review," *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 34, No. 1, pp. 1-38, 2018.
- [5] B. T. Gibson *et al.*, "Friction stir welding: Process, automation, and control," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 16, No. 1, pp. 56-73, 2014.
- [6] W. M. Thomas, M. G. Murch, E. D. Nicholas, P. Temple-Smith, J. C. Needham, and C. J. Dawes, "Improvements relating to friction welding," Patent Appl. EP0653265A2, 1991.
- [7] S. Chen, H. Li, S. Lu, R. Ni, and J. Dong, "Temperature measurement and control of bobbin tool friction stir welding," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 86, No. 1-4, pp. 337-346, 2015.
- [8] J. Martin and S. Wei, "Friction Stir Welding Technology for Marine Applications," in *Friction Stir Welding and Processing VIII*, R. S. Mishra, M. W. Mahoney, Y. Sato, and Y. Hovanski, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 219-226.
- [9] M. Skinner and R. L. Edwards, "Improvements to the FSW Process Using the Self-Reacting Technology," *Materials Science Forum*, Vol. 426-432, pp. 2849-2854, 2003.
- [10] M. K. Sued, D. Pons, J. Lavroff, and E. H. Wong, "Design features for bobbin friction stir welding tools: Development of a conceptual model linking the underlying physics to the production process," *Materials & Design (1980-2015)*, Vol. 54, pp. 632-643, 2014.
- [11] W.M. Thomas, J. Martin, and C. S. Wiesner, "Discovery Invention and Innovation of Friction Technologies – for the Aluminium Industries," in *11th International Aluminium Conference INALCO* 2010, Netherlands, 2010, pp. 13-22.
- [12] P. L. Threadgill, M. M. Z. Ahmed, J. P. Martin, J. G. Perrett, and B. P. Wynne, "The Use of Bobbin Tools for Friction Stir Welding of Aluminium Alloys," *Materials Science Forum*, Vol. 638-642, pp. 1179-1184, 2010.
- [13] Y. X. Huang, L. Wan, S. X. Lv, and J. C. Feng, "Novel design of tool for joining hollow extrusion by friction stir welding," *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 18, No. 3, pp. 239-246, 2013.
- [14] M. Esmaily *et al.*, "Corrosion behaviour of friction stir-welded AA6005-T6 using a bobbin tool,"

- [37] D. Lohwasser and Z. Chen, "Friction stir welding : from basics to applications," 2010. (in English)
- [38] Z. Ma and R. S. Mishra, "Chapter 2 Friction Stir Microstructure for Superplasticity," in *Friction Stir Superplasticity for Unitized Structures*, Z. Ma and R. S. Mishra, Eds. Boston: Butterworth-Heinemann, 2014, pp. 3-6.
- [39] Z. Y. Ma, A. H. Feng, D. L. Chen, and J. Shen, "Recent Advances Friction in Stir Welding/Processing of Aluminum Alloys: Microstructural Evolution and Mechanical Properties," Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, Vol. 43, No. 4, pp. 269-333, 2017.
- [40] L. Fratini and G. Buffa, "Continuous dynamic recrystallization phenomena modelling in friction stir welding of aluminium alloys: A neuralnetwork-based approach," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture,* Vol. 221, No. 5, pp. 857-864, 2007.
- [41] H. G. Salem, "Friction stir weld evolution of dynamically recrystallized AA 2095 weldments," *Scripta Materialia*, Vol. 49, No. 11, pp. 1103-1110, 2003.
- [42] T. R. McNelley, S. Swaminathan, and J. Q. Su, "Recrystallization mechanisms during friction stir welding/processing of aluminum alloys," *Scripta Materialia*, Vol. 58, No. 5, pp. 349-354, 2008.
- [43] h. aghamohammadi, r. jamshidi, A. Heidarpour, y. mazaheri, and m. nemati, "Effect of friction stir processing with different pass numbers on the mechanical, tribological and corrosion properties of Al6061," *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 12-21, 2018. (in Persian (فارسی)
- [44] L. Liu, H. Nakayama, S. Fukumoto, A. Yamamoto, and H. Tsubakino, "Microstructural Evolution in Friction Stir Welded 1050 Aluminum and 6061 Aluminum Alloy," *MATERIALS TRANSACTIONS*, Vol. 45, No. 8, pp. 2665-2668, 2004.
- [45] D. F. O. Braga, A. C. F. da Silva, and P. M. G. P. Moreira, "4 - Mechanical properties," in *Advances in Friction-Stir Welding and Processing*, M. K. B. Givi and P. Asadi, Eds.: Woodhead Publishing, 2014, pp. 141-197.
- [46] S.-T. Chen, T.-S. Lui, and L.-H. Chen, "Effect of Revolutionary Pitch on the Microhardness Drop and Tensile Properties of Friction Stir Processed 1050 Aluminum Alloy," *Materials Transactions*, Vol. 50, No. 8, pp. 1941-1948, 2009.

Technology of Welding and Joining, Vol. 8, No. 6, pp. 450-454, 2013.

- [27] S. El Mouhri, S. Ettaqi, A. Laazizi, and S. Benayoun, "FSW of Aluminum Alloys: Effect of Operating Parameters on the Weld Quality," *Key Engineering Materials*, Vol. 640, pp. 43-50, 2015.
- [28] P. Vijayasarathi and D. C. Selvam, "Investigation and Analysis of Metallurgical and Mechanical Properties of AA1100 using FSW," 2014, Vol. 1, No. 7, p. 10, 2014-08-17 2014.
- [29] A. D. Anggono, B. Sugito, A. Hariyanto, Subroto, and Sarjito, "Mechanical Behaviour Investigation Of Aluminium Alloy Tailor Welded Blank Developed By Using Friction Stir Welding Technique," *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 914, 2017.
- [30] A. D. Anggono, T. W. B. Riyadi, Sarjito, D. Triyoko, B. Sugito, and A. Hariyanto, "Influence of tool rotation and welding speed on the friction stir welding of AA 1100 and AA 6061-T6," 2018.
- [31] J. Zapata, J. Valderrama, E. Hoyos, and D. LÓPEZ, "Mechanical properties comparison of friction stir welding butt joints of aa1100 made in a conventional milling machine and a fsw machine", *DYNA*, Vol. 80, pp. 115-123, 2013.
- [32] Z. Y. Ma, R. S. Mishra, M. W. Mahoney, and R. Grimes, "High strain rate superplasticity in friction stir processed Al–Mg–Zr alloy," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 351, No. 1-2, pp. 148-153, 2003.
- [33] W. F. Xu, J. H. Liu, D. L. Chen, G. H. Luan, and J. S. Yao, "Improvements of strength and ductility in aluminum alloy joints via rapid cooling during friction stir welding," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 548, pp. 89-98, 2012.
- [34] M.-H. Ku, F.-Y. Hung, and T.-S. Lui, "Examination of the High Tensile Ductility Improvement in an As-Solutionized AA7075 Alloy with the Aid of a Friction Stir Process," *Metals*, Vol. 9, No. 2, 2019.
- [35] S.-T. Chen, T.-S. Lui, and L.-H. Chen, "Examination of the Tensile Deformation Resistance and Ductility of Friction Stir Processed Al-Cu 2218 Alloy at Elevated Temperatures," *Materials Transactions*, Vol. 51, No. 8, pp. 1474-1480, 2010.
- [36] C.-Y. Lin, T.-S. Lui, and L.-H. Chen, "Microstructural Variation and Tensile Properties of a Cast 5083 Aluminum Plate via Friction Stir Processing," *Materials Transactions*, Vol. 50, No. 12, pp. 2801-2807, 2009.