

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ با ابزار دوکی شکل شناور

مصطفی زینعلی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

غلام حسین خلف

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

امین ربیعی زاده*

استادیار، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

چکیده

ابزار دوکی شکل، طراحی نوینی از ابزار برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است که انجام جوشکاری دوطرفه را در یک پاس میسر می‌سازد. هدف اصلی این تحقیق طراحی و ساخت ابزار دوکی شکل شناور می‌باشد که پس از ساخت آن، به منظور ارزیابی توانایی این ابزار قابلیت جوشکاری آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ با ابزار طراحی شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان دادند که جوش‌های سر به سر با کیفیت و عاری از عیبی را می‌توان با این ابزار تولید کرد. استحکام جوش‌های بدست آمده در حد استحکام نمونه‌های جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی با ابزار معمولی می‌باشد. نمونه‌های به‌دست‌آمده به‌منظور بررسی کیفیت و قدرت جوش تولیدشده مورد بررسی آزمون‌های مکانیکی از جمله کشش و سختی قرار گرفت. نیل به راندمان اتصال ۶۰٪ نشان‌دهنده موفقیت در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و در نتیجه کارایی ابزار مورد طراحی است. دومین مشخصه اساسی مورد بررسی در جوش سختی می‌باشد که به دلیل انحلال رسوبات، افت سختی در ناحیه اغتشاشی مشاهده می‌شود که رفتار گزارش شده در ناحیه جوش توسط محققان دیگر را مورد تأیید قرار داده است. **واژه‌های کلیدی:** جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دو طرفه، ابزار دوکی شکل شناور، طراحی و ساخت، راندمان اتصال.

Friction Stir Welding of 6061 al alloy by floating bobbin tool

M. Zeinali

Department of Mechanical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Gh. H. Khalaf

Department of Mechanical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

A. Rabiezadeh

Young Researchers and Elite Club, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Abstract

The bobbin tool is a new design of the friction stir welding tool that provides the opportunity of the simultaneous double sided welding. The present research aims to design and manufacture a floating bobbin tool; the capability of which is examined through welding aluminum alloy 6061. The results indicated that the high quality and defect-free butt welds can be produced via this tool. Moreover, the strength of the welds is similar to the strength of welded samples done by the conventional friction stir welding method. Regarding the quality and strength, the obtained samples were investigated by mechanical tests including tensile strength test and hardness test. Obtaining 60.7% joint efficiency is indicative of success in the friction stir welding process; and, thus the efficiency of the designed tool. Besides, the second major characteristic of welding is the hardness, which is due to the dissolution of sediments, is decreased in the stirred area. This finding is confirmed by the behavior reported by the other investigators in the literature.

Keywords: double sided friction stir welding, floating bobbin tool, design and manufacturing, joint efficiency.



شکل ۱- ابزار در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [۴].

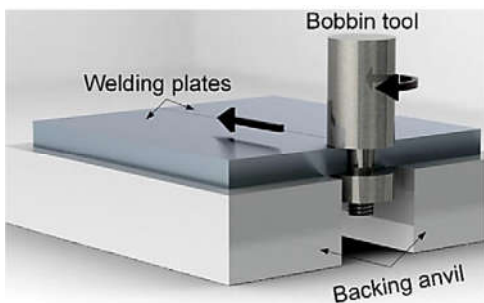
۱- مقدمه

امروزه آلومینیوم بعد از فولاد پرمصرف‌ترین فلز دنیا است. آلومینیوم و آلیاژهای آن نقش تعیین‌کننده‌ای در صنعت معاصر دارند. بدون آلومینیوم، ساخت هواپیما، کشتی و دیگر ادوات نظامی امکان‌پذیر نبوده و وسایل نقلیه موتوری سوخت بیشتری مصرف می‌کردند [۱-۳]. روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی توسط توماس و همکارانش در سال ۱۹۹۱ تحت عنوان موسسه جوشکاری (TWI) در انگلستان ابداع گردید. در این روش ابزار مهم‌ترین بخش محسوب می‌شود که با توجه به انواع پیکربندی‌های متفاوت، جنس و ضخامت مواد، مشخصات طراحی گوناگونی دارد (شکل ۱) [۴].

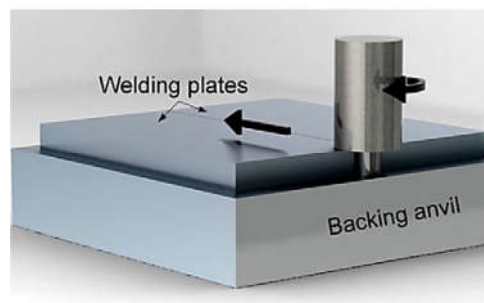
* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: a.rabiezadeh@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۱/۰۹

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۹/۰۴



ب



الف

شکل ۲- تصویر طرحواره جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی؛ الف. با ابزار ساده؛ و ب. با ابزار دوکی شکل [۵]

به اندازه کافی در این مبحث جوشکاری مورد بحث قرار نگرفته اند لذا جای خالی تحقیق و پژوهش در این حوزه ها کاملاً احساس می شود [۵]. ۱۰، ۱۳. اولین پژوهش در ایران در این زمینه توسط کریمی و همکاران توسط ابزار دوکی شکل ثابت بر روی آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ انجام شد و سبب بهبود خواص مکانیکی قطعات جوشکاری شده با این روش نسب به روش معمول گردید [۱۴].

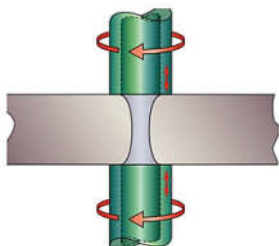
از این رو در این پژوهش اتصال همجنس آلیاژ آلومینیم سری 6xxx با استفاده از ابزار دوکی شکل شناور مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. در این راستا ابزار دوکی شکل شناور طراحی و ساخته شد. پس از آن فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی ورق آلومینیم آلیاژی ۶۰۶۱ اجرا گردید. قطعات جوشکاری شده به منظور ارزیابی کیفیت و راندمان اتصال، قطعات جوشکاری شده تحت بازرسی چشمی، آزمون کشش و سختی قرار گرفتند.

۲- مبانی روشها

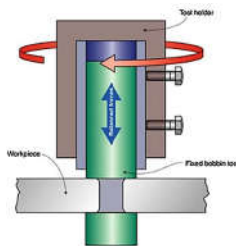
فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار دوکی شکل بر روی قطعاتی از جنس آلیاژ آلومینیم AA 6061-T6 صورت گرفت. آنالیز کوانتومتری به منظور تعیین جنس نمونه ها انجام شد (جدول ۱). نمونه ها از ورقی با ضخامت ۴ میلی متر در ابعاد ۷۵ در ۲۵۰ میلی متر تهیه شد. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نمونه ها به صورت لب به لب انجام شد. به منظور ساخت ابزار فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از فولاد گرمکار H13 که تا 50 ± 2 راکول سی سخت کاری شده، استفاده شد. فرآیند عملیات حرارتی ویژه ای به منظور نیل به سختی در حدود 50 ± 2 راکول برای این قطعات طراحی شده است که در شکل ۴ قابل مشاهده می باشد.

مزایای اصلی این نوع جوشکاری در مقایسه با جوشکاری ذوبی و حرارتی مرسوم، کاهش انرژی مورد نیاز، عدم نیاز به مواد مصرفی، توان ایجاد جوش مناسب بدون تخلخل، عدم وجود دود، گردوغبار مضر، به حداقل رساندن اثرات نامطلوب زیست محیطی، کاهش ضایعات جوشکاری، کاهش تهدیدات سلامت فردی و افزایش ایمنی می باشد. فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار دوکی شکل مزایای بیشتری نسبت به روش مرسوم آن دارد؛ که از آن جمله می توان به کاهش نیروی مورد نیاز جوشکاری، امکان افزایش سرعت جوشکاری و کاهش قیدوبندهای مورد نیاز اشاره نمود. این موضوع در صنایعی که نیاز به اتصال ورق هایی با ضخامت کم دارند مانند صنایع کشتی سازی، هواپیماسازی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۶].

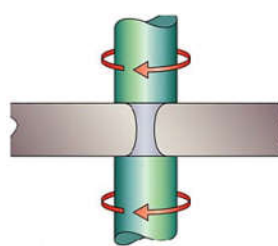
ابزار دوکی شکل جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دارای دو شانه است. یکی از شانه ها در سطح بالایی و دیگری در سطح پایینی قطعه کار، قرار می گیرد. مشاهده گردیده است پیکربندی جوش و عیوب جوشکاری زمانی که ابزار دوکی شکل معرفی شد، حذف و یا به حداقل رسیده اند. این ابزار شامل یک پین نیز است. پین در ابزار دوکی شکل به طور کلی درون قطعه کار قرار می گیرد. این موضوع موجب کاهش الزامات و ساده شدن عملیات آماده سازی قبل از جوشکاری خواهد شد. دلیل این امر نیز کاهش نیروی عمودی اعمال شده به وسیله ابزار دوکی شکل و قرارگیری نیروی های فعال جوش در قطعه کار بین دو شانه، است (شکل ۲) [۵، ۷-۱۱]. تاکنون سه نوع ابزار دوکی شکل معرفی شده است (شکل ۳): الف. ابزار دوکی شکل ثابت؛ ب. ابزار دوکی شکل شناور و ج. ابزار دوکی شکل خودتنظیم [۱۲]. از سوی دیگر، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار دوکی شکل دارای خواص مکانیکی پایین تر، دانه بندی بزرگ تر و یکنواختی در مقایسه با جوشکاری با ابزار معمولی است. معایب و یا دیدگاه های کاربردی



ج



ب



الف

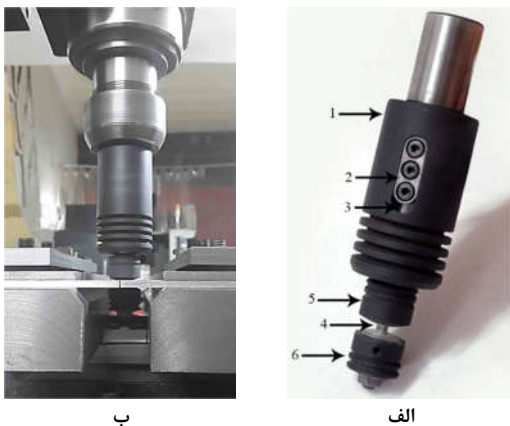
شکل ۳- الف. ابزار دوکی ثابت؛ ب. ابزار دوکی شناور؛ و ج. ابزار دوکی خودتنظیم [۱۲]

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti
98.8	0.389	0.177	0.024	0.014	0.479	<0.005	0.005	0.007	0.005

۳- نتایج

با بررسی چشمی جوش می‌توان به عیوب سطحی جوش پی برد. در شکل ۶ عیوب ظاهری جوش کاملاً مشهود است. این عیب، عیب عدم پر شدگی درز جوش نامیده می‌شود. این نوع عیب می‌تواند در ظاهر و یا درون جوش و یا حتی به‌صورت بازه‌ای در جوش مشاهده شود. در مقابل در شکل ۶ ب جوش باکیفیت قابل‌مشاهده است. در این پژوهش عیوبی مانند عیوب ورود ابزار، عیوب خروج ابزار و همچنین عیوب درز جوش پر نشده مشاهده گردید.

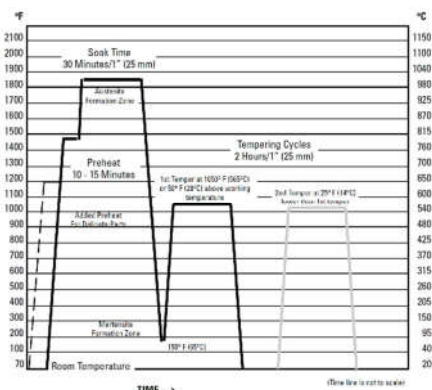


شکل ۵- الف. ابزار دوکی شکل شناور؛ و ب. تصویر واقعی ابزار در حین فرآیند جوشکاری

جدول ۲- نتایج بررسی ترکیب‌های متفاوت سرعت چرخش و سرعت پیشروی ابزار

نتیجه آزمون اولیه	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت چرخشی (RPM)
نامطلوب - مشاهده عیب درز پر نشده در پشت	۶۳	۶۰۰
نامطلوب - مشاهده عیب درز پر نشده در پشت	۱۰۰	۸۰۰
نامطلوب - مشاهده عیب درز پر نشده در پشت	۶۳	۸۰۰
مطلوب - کیفیت مناسب جوش در هر دو سمت	۳۱.۵	۸۰۰

لازم به ذکر است این عیوب در ابزار مرسوم جوشکاری اصطکاک‌آگاهی نیز وجود دارد و بانام عیوب حفره ورود و خروج ابزار شناخته می‌شود (شکل ۶ ج و د). پس از انجام آزمون کشش، نمودارهای تنش مهندسی برحسب کرنش مهندسی رسم گردید. به منظور اطمینان از نتایج آزمون کشش برای نمونه‌های جوشکاری شده، این آزمون ۵ بار تکرار شد که نتایج آن در جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشد.

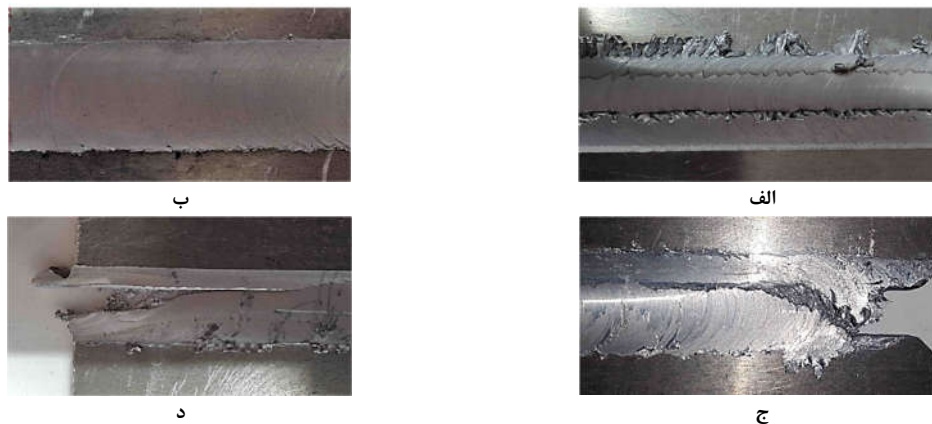


شکل ۴- مراحل انجام عملیات حرارتی فولاد گرم کار H13 [۱۵]

تصویر ابزار دوکی شکل شناور در شکل ۵ ارائه شده است: ۱. بدنه ابزار؛ از وظایف این قطعه می‌توان به حفظ انسجام کلی ابزار، اتصال ابزار به دستگاه فرز، امکان ایجاد حرکت شناوری در ابزار و کمک به انتقال حرارت ابزار با محیط اشاره نمود؛ ۲. میله شناور؛ یکی از روش‌های حذف نیروی عمودی، استفاده از قابلیت شناوری در ابزار جوشکاری است؛ ۳. محدود کننده شناوری؛ از این قطعه به‌منظور محدود نمودن حرکت شناوری در ابزار استفاده می‌شود؛ ۴. پین؛ پین علاوه بر ایفای نقش در ایجاد گرما به‌وسیله اصطکاک، وظیفه هم زدن و ایجاد جریان مواد در طول درز جوش و انتقال مواد از جلو ابزار به سمت پشت ابزار و همچنین جریان مواد در امتداد ضخامت مواد را دارا است؛ ۵. شانه بالایی ابزار؛ یکی از پراهمیت‌ترین قطعات تشکیل‌دهنده ابزار جوشکاری اصطکاک‌آگاهی دوطرفه، شانه بالایی ابزار است؛ ۶. شانه پایینی ابزار؛ اهمیت این قطعه نیز به‌اندازه‌ی اهمیت شانه بالایی ابزار است.

با بررسی‌های انجام‌شده در مقالات متعدد دستگاه فرز FP4M برای انجام فرآیند جوشکاری اصطکاک‌آگاهی با ابزار دوکی شکل شناور انتخاب گردید. همان‌طور که گفته شد، در این نوع جوشکاری باید دو پارامتر اساسی دستگاه را مشخص کرد. بنابراین با توجه به پیشنهاد تحقیق، سرعت چرخشی ۸۰۰ دور بر دقیقه و همچنین سرعت پیشروی ۳۱/۵ به‌عنوان مقادیر ورودی در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است با توجه به تعدد مقادیر بیان‌شده در مقالات 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 درنهایت مقادیر فوق انتخاب شد (جدول ۲).

جهت اندازه‌گیری میزان سختی نمونه از روش ریز سختی سنجی ویکرز استفاده گردید. این آزمون توسط دستگاه مدل DHV-100 انجام شد. ریزسختی سنجی با نیروی ۹/۸ نیوتن و در مدت زمان ۱۵ ثانیه انجام شد. به منظور بررسی‌های ریزساختاری آماده‌سازی نمونه‌ها با استفاده از سباده‌های ۴۰۰ تا ۲۰۰۰ انجام شد. آزمون استحکام کششی با استفاده از دستگاه کشش universal مطابق با استاندارد ASTM-E8 انجام شد.



شکل ۶- تصویر ماکروگراف جوش: الف. ظاهر جوش نامناسب؛ ب. ظاهر جوش مناسب و بدون عیب؛ ج. عیب ورود ابزار؛ و د. عیب خروج ابزار

6061-T6 گزارش شده است. سختی اولیه آلایز آلومینیوم 6061 که جزء آلایزهای عملیات حرارتی پذیر می‌باشد در حدود ۹۵ ویکرز اندازه گیری گردید. این سختی در اثر عملیات حرارتی پیرسازی مصنوعی که مکانیزم آن رسوب سختی است، در فلز پایه ایجاد شده است. وجود دماهای کاری بالا در حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، به ترتیب در ناحیه هم خورده، ترمومکانیکال و در ناحیه متأثر از گرما موجب انحلال بخشی از فازهای سخت رسوبی می‌شوند، در نتیجه مقداری نرم شدگی در ناحیه جوش این آلایز عملیات حرارتی پذیر که در حالت T6 تمپر شده است انتظار می‌رود [۱۶].

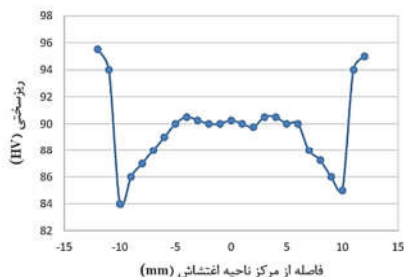
جدول ۳- نتایج آزمون کشش فلز پایه و نمونه جوشکاری شده و راندمان اتصال

عنوان	استحکام کششی (MPa)	راندمان اتصال
مواد پایه	۲۹۶/۷	-
نمونه جوشکاری ۱	۱۸۰	۶۰/۶
نمونه جوشکاری ۲	۱۷۹/۲	۶۰/۴
نمونه جوشکاری ۳	۱۷۹/۵	۶۰/۵
نمونه جوشکاری ۴	۱۸۴/۶	۶۲/۲
نمونه جوشکاری ۵	۱۷۹/۱	۶۰/۴
میانگین نمونه‌ها	۱۸۰	۶۰/۶

جدول ۴- راندمان اتصال گزارش شده در پژوهش‌های متعدد

مرجع	راندمان اتصال	استحکام کششی جوش (MPa)	استحکام کششی ماده پایه (MPa)	نوع مواد
[۱۷]	۸۴	۹۲	۱۱۰	Al1100
[۱۸]	۸۲	۳۵۴	۴۲۸	Al2017-T351
[۱۹]	۸۳-۹۰	۴۱۰-۴۳۴	۴۸۳-۴۹۳	Al2024-T351
[۱۷]	۶۲-۶۶	۲۹۷-۳۱۱	۴۷۰-۴۷۶	Al2219-T87
[۲۰]	۸۹-۹۰	۴۲۵-۴۴۱	۴۷۸	Al2024-T3
[۲۱]	۸۰	۳۹۵	۴۹۹	Al2019-T851
[۲۲]	۹۵-۱۱۹	۲۷۱-۳۴۴	۲۸۵-۲۹۸	Al5083-O
[۱۶]	۶۴	۲۳۱	۳۴۲	Al6061-T6

به منظور بررسی نتایج آزمون کشش پژوهش‌های متعددی در خصوص راندمان اتصال مورد ارزیابی قرار گرفت، که داده‌ها در جدول ۴ آورده شده است. در ردیف ۸ جدول ۴ راندمان اتصال آلومینیوم آلایزی 6061-T6 مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش راندمان اتصال ۶۴ درصد اعلام شده است. با توجه به میانگین راندمان ۶۰/۶ به دست آمده، موفقیت این پژوهش قابل مشاهده و درک است. در شکل ۷ پروفیل ریزسختی ناحیه اتصال قابل مشاهده است.



شکل ۷- پروفیل ریزسختی آلایز 6061-T6 جوشکاری شده

۴- نتیجه‌گیری

فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمول با وجود همه مزایا و قابلیت‌هایی که در مقایسه با روش‌های جوشکاری ذوبی آلایزهای آلومینیوم دارد، دارای معایبی نیز می‌باشد که از جمله آن‌ها می‌توان به بروز عیب و ترک در ناحیه ریشه جوش، نیاز به نیروی عمودی عملیاتی زیاد اشاره نمود. کاهش نیروهای لازم برای اجرای فرآیند به خصوص نیروی عمودی، یکی از نیازهای کلیدی برای طراحی دستگاه جوشکاری

از این شکل استنباط می‌شود که هرچه به سمت درز جوش حرکت می‌کنیم، سختی کاهش می‌یابد. چنین رفتاری توسط سایر محققین نیز در خصوص پروفیل سختی ناحیه جوشکاری شده آلایز

- [10] Chen, J., Fujii, H., Sun, Y., Morisada, Y., and Kondoh, K., 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.
- [11] Chen, J., Fujii, H., Sun, Y., Morisada, Y., and Ueji, R., Fine grained Mg-3Al-1Zn alloy with randomized texture in the double-sided friction stir welded joints, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 580, pp. 83-91, 2013.
- [12] Vilaça, P. and Thomas, W., Friction Stir Welding Technology, Vol. 8, pp. 85-124, 2011.
- [13] Sued, M. K., Pons, D., Lavroff, J., and Wong, E. H., 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.
- [۱۴] کریمی ایوانکی م، افشاری د. و صیدی ح. بررسی تاثیر هندسه ابزار ماسوره‌های در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی الیاز آلومینیوم ۶۰۶۱ پانزدهمین کنفرانس ملی و چهارمین کنفرانس بین المللی مهندسی ساخت و تولید، تهران، ایران، ۱۳۹۷. [Online].
- [15] Bryson, W. E., Heat Treating H13 Tool Steel, in *Heat Treatment, Selection, and Application of Tool Steels*: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2005, pp. 63-68.
- [16] Moreira, P. M. G. P., Santos, T., Tavares, S. M. O., Richter-Trummer, V., Vilaça, P., and de Castro, P. M. S. T., Mechanical and metallurgical characterization of friction stir welding joints of AA6061-T6 with AA6082-T6, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 1, pp. 180-187, 2009.
- [17] Rajakumar, S. and Balasubramanian, V., Establishing relationships between mechanical properties of aluminium alloys and optimised friction stir welding process parameters, *Materials & Design*, Vol. 40, pp. 17-35, 2012.
- [18] Liu, H. J., Fujii, H., Maeda, M., and Nogi, K., Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, No. 3, pp. 692-696, 2003.
- [19] Bussu, G. and Irving, P. E., The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351 aluminium joints, *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, No. 1, pp. 77-88, 2003.
- [20] Nejad, S. G., Yektapour, M., and Akbarifard, A., Friction stir welding of 2024 aluminum alloy: Study of major parameters and threading feature on probe, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 31, No. 11, pp. 5435-5445, 2017.
- [21] Richter-Trummer, V., Suzano, E., Beltrão, M., Roos, A., dos Santos, J. F., and de Castro, P. M. S. T., Influence of the FSW clamping force on the final distortion and residual stress field, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 538, pp. 81-88, 2012.
- [22] Paik, J., Mechanical properties of friction stir welded aluminum alloys 5083 and 5383, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 39-49, 2009.

اصطکاکی اغتشاشی متحرک می‌باشد. یکی از گزینه‌های پیشنهادی برای کاهش نیروی عمودی این فرآیند، استفاده از تکنیک ابزار دوکی شکل می‌باشد. ابزار طراحی شده در این پژوهش با موفقیت مراحل آزمون را پشت سر گذاشته است. همچنین اتصال همجنس الیازهای آلومینیوم 6061-T6 به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه با استفاده از ابزار دوکی شکل به صورت موفقیت آمیز انجام شد. مهمترین نتایج این تحقیق عبارتند از:

- با جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دو طرفه با استفاده از ابزار دوکی شکل، اتصالی با نفوذ کامل و عاری از عیب ایجاد شد.
- در خصوص جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی الیاز آلومینیوم 6061-T6 با ضخامت ۴ میلی‌متر، سرعت چرخش ابزار و سرعت پیشروی ابزار بهینه به ترتیب ۸۰۰ rpm و ۳۱/۵ mm/min است.
- راندمان اتصال الیاز آلومینیوم 6061-T6 به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار دوکی شکل ۶۰/۶ بدست آمد که تطابق خوبی با نتایج بدست آمده توسط سایرین دارد.
- پروفیل سختی نمونه جوشکاری شده، سختی کمتری در ناحیه اغتشاش از خود نشان می‌دهد که به دلیل انحلال جزئی رسوبات در نتیجه حرارت ناشی از فرآیند جوشکاری می‌باشد.

۵- مراجع

- [1] Mukhopadhyay, P., Alloy Designation, Processing, and Use of AA6XXX Series Aluminium Alloys, *ISRN Metallurgy*, Vol. 2012, pp. 1-15, 2012.
- [2] Fridlyander, I. N., Sister, V. G., Grushko, O. E., Berstenev, V. V., Sheveleva, L. M., and Ivanova, L. A., Aluminum Alloys: Promising Materials in the Automotive Industry, *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 44, No. 9, pp. 365-370, 2002.
- [3] Zhang, X., Chen, Y., and Hu, J., Recent advances in the development of aerospace materials, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 97, pp. 22-34, 2018.
- [4] Mohan, D. and Schloar, P. G., Friction stir welding tools and overview, *International Journal of IT, Engineering and Applied Sciences Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 11-15, 2014.
- [5] Esmaily, M., Mortazavi, N., Osicowicz, W., Hindsefelt, H., Svensson, J. E., Halvarsson, M., Martin, J. and Johanson, L. G., Bobbin and conventional friction stir welding of thick extruded AA6005-T6 profiles, *Materials & Design*, Vol. 108, pp. 114-125, 2016.
- [6] Xu, W., Luo, Y., Zhang, W., and Fu, M., Comparative study on local and global mechanical properties of bobbin tool and conventional friction stir welded 7085-T7452 aluminum thick plate, *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 34, No. 1, pp. 173-184, 2018.
- [7] Kumar, K., Kailas, S. V., and Srivatsan, T. S., "Influence of Tool Geometry in Friction Stir Welding," *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 23, No. 2, pp. 188-194, 2008.
- [8] Wang, F. F., Li, W. Y., Shen, J., Hu, S. Y., and dos Santos, J. F., Effect of tool rotational speed on the microstructure and mechanical properties of bobbin tool friction stir welding of Al-Li alloy, *Materials & Design*, Vol. 86, pp. 933-940, 2015.
- [9] Li, W. Y., Fu, T., Hutsch, L., Hilgert, J., Wang, F. F., Santos, J. F. and Huber, N., Effects of tool rotational and welding speed on microstructure and mechanical properties of bobbin-tool friction-stir welded Mg AZ31, *Materials & Design*, Vol. 64, pp. 714-720, 2014.