



مطالعه تجربی ساخت ساندویچ فلزی دوجنسی با هسته فوم آلومینیومی و رویه مسی با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

محسن درودگر¹، سیدمحمدحسین سیدکاشی^{2*}، موسی ساجد³

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

* بیرجند، صندوق پستی 97175-376، seyedkashi@birjand.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 4 مرداد 1399

داوری اولیه: 2 شهریور 1399

پذیرش: 28 مهر 1399

کلیدواژگان:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

ساندویچ دوفلزی

فوم آلومینیومی

ورق مسی

استحکام کششی جوش

ساندویچ‌های فوم فلزی دسته‌ای از مواد فوق سبک هستند که از یک هسته متخلخل فلزی و دو صفحه فلزی بیرونی ساخته می‌شوند. نسبت استحکام به چگالی و ظرفیت جذب انرژی بالا، مقاومت در برابر حرارت و قابلیت بازیافت سریع و ارزان، کاربرد این مواد را در بسیاری از صنایع از جمله خودروسازی، هوافضا، نفت و انرژی و ساختمان، ایده‌آل کرده است. با توجه به مزیت‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، اتصال صفحات این پل‌ها از طریق این نوع جوشکاری می‌تواند به‌خصوص در مواردی که نیاز به اتصال آلیاژهای غیرهمجنس وجود دارد، به کار گرفته شود. در این پژوهش، امکان‌سنجی تولید ساندویچ فلزی با هسته فوم آلومینیوم و دو لایه ورق مسی در دو طرف آن با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد مطالعه قرار گرفت. پارامترهای مورد مطالعه، سرعت دورانی ابزار در مقادیر 2000، 2500 و 3000 دور بر دقیقه و همچنین زاویه انحراف ابزار در مقادیر 5 و 7 درجه انتخاب شد. مقاطع جوش به منظور ارزیابی کیفیت جوش مورد مطالعه قرار گرفت که بیانگر موفقیت روش مورد استفاده در تولید ساندویچ فلزی است. به منظور ارزیابی استحکام اتصالات از آزمون کشش استفاده شد. نتایج بیانگر این است که تأثیر سرعت دورانی بر استحکام جوش بسیار بیشتر از زاویه انحراف ابزار می‌باشد و با استحکام کششی نسبت معکوس دارد. بیشترین استحکام کششی مربوط به نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ابزار 2000 دور بر دقیقه و زاویه انحراف ابزار 5 درجه با مقدار 18,8 مگاپاسکال است.

Experimental study on manufacturing of bi-metal sandwiches with aluminum foam core and copper layers using friction stir welding

Mohsen Dorudgar¹, S. M. Hossein Seyedkashi^{1*}, Moosa Sajed²

1- Mechanical Engineering Department, University of Birjand, Birjand, Iran.

2- Mechanical Engineering Department, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

* P.O.B. 97175-376, Birjand, Iran, seyedkashi@birjand.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 25 July 2020
First Decision: 23 August 2020
Accepted: 19 October 2020

Keywords:

Friction Stir Welding
Bi-Metal Sandwich
Aluminum Foam
Copper Sheet
Weld Tensile Strength

Abstract

Metal sandwiches are a new class of ultra-lightweight materials made from a porous metal core and two outer metal plates. High strength and high energy absorption capacity, resistance to heat, and also fast and inexpensive recyclability make these materials ideal for use in many industries including automotive, aerospace, oil, energy and construction industries. Considering the advantages of friction stir welding, the connection of these plates using this welding technology can be used industries for welding of bimetal sandwiches. In this research, feasibility of using frictional stir welding to prepare metal sandwiches with a core of aluminum foams and copper covers was investigated. The investigated parameters were tool rotational speed, in three levels of 2000, 2500 and 3000 rpm, and tilt angle in two levels of 5 and 7 degree. The cross-sections of the joints were investigated for weld quality which confirmed a successful joining. Tensile tests were carried out to evaluate the joint strength. It was concluded that the effect of tool rotational speed on the weld strength is much higher than the effect of tilt angle and has a reverse relation with tensile strength. The best strength which was 18.8 MPa was obtained with a tool rotational speed of 2000 rpm and a tilt angle of 5 degree.

1- مقدمه

مورد استفاده قرار گرفت. این فرآیند، یک جوشکاری حالت جامد

است که از ترکیب نیروی مکانیکی و حرارت ناشی از اصطکاک برای اتصال قطعات در دمایی زیر نقطه ذوب، استفاده می‌کند

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اولین بار در سال 1991 در انستیتو جوشکاری انگلستان ابداع و برای آلیاژهای آلومینیوم

Please cite this article using:

M. Dorudgar, S. M. H. Seyedkashi, M. Sajed, Experimental study on manufacturing of bi-metal sandwiches with aluminum foam core and copper layers using friction stir welding, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 12, pp. 1-9, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

با استفاده از قطعاتی با وزن پایین‌تر به دست آورد. همچنین از این پانل‌ها برای کاربردهای مقاوم به ضربه و نفوذ می‌توان استفاده نمود.

ساده‌ترین و متداول‌ترین روش ساخت ساندویچ‌های با هسته‌ی فوم فلزی، اتصال چسبی می‌باشد که به دلیل مشکلات و محدودیت‌های آن، منجر شده است تا تلاش‌هایی جهت ساخت این نوع ساندویچ‌ها به روش‌های دیگر صورت بگیرد. از جمله آنکه در سال 2014 هنگای و همکاران [9] با استفاده از روش اصطکاکی اغتشاشی به تولید ساندویچ پنل فومی به کمک عملیات اصطکاکی اغتشاشی پرداختند. به این صورت که یک لایه در زیر از جنس آلیاژ آلومینیوم ADC6 قرار داده شد و در روی این قطعه، دو قطعه آلیاژ آلومینیوم ADC12 که در بین آن‌ها پودر Al_2O_3 وجود داشت، قرار داده شد. سپس از سمت صفحه بالایی، عملیات اصطکاکی اغتشاشی انجام شد تا صفحات و پودر مابین آن‌ها به حالت یکپارچه درآیند. سپس با عملیات ماشینکاری، قطعه‌ای که شامل صفحه زیرین از جنس ADC6 و مکعب مستطیلی که حاصل فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بود، از آن خارج شد. به همین صورت قطعه مشابه دیگری تولید گردید و در نهایت این دو قطعه به صورت موازی از سمت مکعبی شکل توسط قید و بند در کنار هم قرار گرفته و در کوره تا دمای 948 درجه کلون، حرارت دیدند. محصول نهایی ساندویچ پنلی با ورقه‌هایی از جنس آلومینیوم ADC6 و با هسته‌ی فوم آلومینیومی بود. پس از آن در سال 2015 نوکی¹ و همکارش [10] فومی از جنس آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم و همچنین کامپوزیت فومی با جنس AlSi-SiC را با جوشکاری ذوبی TIG و جوش لیزر مورد آزمایش قرار دادند. در این جوشکاری از مواد پرکننده نیز استفاده شد. در نهایت ساختار اتصالات جوشکاری شده بررسی شد و با آزمون کشش، میزان استحکام کششی نمونه‌ها بالاتر از استحکام کششی ماده پایه به دست آمد. در سال 2019 یائو² و همکاران [6] به تولید ساندویچ فوم آلومینیومی به روش جوش فاز مایع گذرا³ پرداختند. ساختار اتصال توسط میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی، و طیف‌سنجی انرژی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین استحکام اتصال توسط آزمون‌های کشش و آزمون خمش سه نقطه‌ای اندازه‌گیری شد و نتایج آن با نمونه‌های اتصال چسبی، مورد مقایسه قرار گرفت و مشاهده شد استحکام شکست و خستگی در این روش اتصال، بالاتر از اتصال به روش چسب می‌باشد.

[1]. به همین دلیل در این نوع جوشکاری، به نسبت جوشکاری ذوبی، انرژی کمتری مورد نیاز خواهد بود. ابزار مورد استفاده در این فرایند، غیرمصرفی و عموماً استوانه‌ای شکل و دارای یک پین است که در مرز اتصال دو قطعه قرار گرفته و با اعمال حرکت دورانی و همچنین حرکت در مسیر جوش، در نهایت، با نرم کردن و به جریان انداختن مواد، اتصال را فراهم می‌کند [2]. سرعت چرخشی ابزار، سرعت جابجایی ابزار و فشار عمودی وارد بر صفحات، از عوامل اصلی تأثیرگذار در این نوع جوشکاری هستند [3]. همچنین به عنوان سایر عوامل تأثیرگذار می‌توان به شکل پین ابزار اشاره کرد که در حالت کلی، یکی از انواع استوانه‌ای ساده، مخروطی، رزوه‌دار، مربعی و مثلثی انتخاب می‌شود [4]. فوم‌های فلزی در سال‌های گذشته به عنوان دسته‌ی جدیدی از مواد با خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و صوتی ویژه‌ای ظهور پیدا کرده‌اند. این مواد، ویژگی‌های منحصربفردی دارند که از آن‌جمله چگالی پایین، نسبت استحکام به چگالی بالا، عایق بودن در برابر صوت و حرارت، قدرت جذب انرژی بسیار بالا در تنش‌های فشاری و در طول تغییرشکل پلاستیک، قابلیت جذب ارتعاشات صوتی و مکانیکی خوب، آتش‌گیر نبودن، قابلیت ماشینکاری خوب و همچنین قابلیت بازیافت و غیرآلاینده بودن است [5]. مجموعه این خواص منحصربفرد در فوم‌های فلزی از جمله فوم آلومینیومی، باعث ایجاد جذابیت و کاربرد روز افزون این مواد در صنایع مختلف، خصوصاً در صنایع حمل و نقل، هوافضا و صنایع ساختمانی شده است. ساندویچ فوم آلومینیومی محصولی شامل یک هسته متخلخل از آلیاژ آلومینیوم و دو صفحه فلزی در دو طرف فوم است. این نوع ساختار، ویژگی‌هایی مانند استحکام، ثبات ابعادی بالا، قابلیت ضربه‌پذیری بالا و عایق صوت بودن را در ساندویچ‌های فلزی فراهم می‌کند [6]. این ساندویچ‌ها در مقایسه با مواد متراکم و فوم خالص، امتیازات ویژه‌ای دارند؛ از جمله اینکه نسبت به ورق فلزی با همان جرم، استحکام بالاتری دارند [7]. همچنین مزیت اصلی آن‌ها در مقایسه با فوم خالص این است که پوسته‌ی بیرونی این اجازه را به ساندویچ می‌دهد تا قادر باشد تنش‌های کششی بیشتری را تحمل کند (بطور مثال زمانی که پنل مورد خم شدن قرار می‌گیرد). مجموعه‌ی این ویژگی‌های منحصربفرد این ساندویچ پنل‌ها را قادر ساخته است تا به طور گسترده‌ای در صنایع حمل و نقل، کشتی‌سازی، راه‌آهن و هوافضا مورد استفاده قرار بگیرند [8].

عمده کاربرد اتصالات آلومینیوم و مس در صنایع الکترونیکی است. با استفاده از پانل‌های ساندویچی می‌توان همان کاربردها را

¹ Nowacki

² Yao

³ Liquid Diffusion Welding

ناهمجنس می‌شود.

در مروری که بر مطالعات انجام شده صورت گرفت، تحقیقی در خصوص تولید ساندویچ فلزی با هسته‌ی فوم و رویه ناهمجنس به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مشاهده نشد. لذا در این پژوهش به تولید این نوع ساندویچ‌ها با رویه ناهمجنس و با استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداخته شد. همچنین اثر سرعت دورانی و زاویه‌ی انحراف ابزار جوشکاری در استحکام اتصالات مورد مطالعه قرار گرفت.

2- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، 12 قطعه مس خالص 99/99 درصد ASTM B115-10 دارای خواص مکانیکی درج شده در جدول 1 و همچنین 6 قطعه فوم آلومینیومی در ابعاد 50×100 میلی‌متر به کار گرفته شد. خواص مکانیکی مس مورد استفاده با استفاده از آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM E8-M بدست آمده است. چگالی فوم آلومینیومی 0/6 گرم بر سانتی‌متر مکعب بود که در شکل 1 نشان داده شده است. ضخامت ورق مسی و فوم آلومینیومی به ترتیب 2 و 4 میلی‌متر بود. برای ساخت این فوم‌ها از روش آلپوراس استفاده شده است. در این روش عامل دمنده (عاملی که در اثر گرما گاز آزاد می‌کند مانند TiH_2) به مذاب آلومینیوم افزوده می‌شود. در اثر آزاد شدن گاز (در این مورد هیدروژن) ضمن سرد شدن فلز، فوم تولید می‌شود. این فوم‌ها در گروه مواد و متالوژی جهاد دانشگاهی دانشگاه فردوسی مشهد تولید شده‌اند. این نوع فوم‌ها ناهمسانگرد هستند و در هر صفحه دارای خواص الاستیک متفاوتی می‌باشند. همچنین کمترین میزان استحکام کششی و فشاری آن‌ها در جهت ضخامت (TT^4) می‌باشد. این مواد عموماً در کشش، رفتاری مشابه یک ماده متراکم دارند اما در فشرده‌سازی، دارای چندین قله هستند و در واقع محدوده‌ای از تنش تسلیم دیده می‌شود [15].

جدول 1 خواص مکانیکی مس خالص

Table 1 Mechanical properties of pure copper

190	استحکام تسلیم (MPa)
225	استحکام کششی (MPa)
27	افزایش طول در 5 cm (%)
57	سختی ویکرز (HV)

همچنین در سال 2019 پنگ¹ و همکاران [11] روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را برای ساخت ساندویچ فوم همجنس آلومینیومی به کار گرفتند. هسته فوم مورد استفاده از جنس آلومینیوم در ابعاد 5×140×150 میلی‌متر مکعب با میزان تخلخل 72% و میانگین ابعاد حفره‌ها 3 میلی‌متر بود. همچنین صفحات طرفین از جنس آلیاژ آلومینیوم AA6061-T6 در ابعاد 3×140×150 میلی‌متر مکعب بود. در این مطالعه از سرعت دورانی ابزار 750 دور در دقیقه و سرعت خطی ابزار 35 میلی‌متر در دقیقه استفاده شد. با حرکت در مسیر تعریف شده با استفاده از کنترل کامپیوتری، تمام مساحت صفحه‌ی آلومینیومی تحت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با فوم زیرین قرار گرفت. در نهایت، آزمون‌های مقاومت خمشی، مقاومت در برابر ضربه و جذب صوت انجام شد و نتایج آن با نتایج اتصالات مشابه که با استفاده از روش‌های چسبی و لحیم‌کاری انجام شده بودند، مقایسه گردید.

نوری و محمدزاده [12] در یک مطالعه تحلیلی با ارایه یک مدل ریاضی و همچنین شبیه‌سازی عددی سعی در بهبود عملکرد پانل ساندویچی نموده‌اند. آنها در تحلیل خود از فوم‌های آلومینیومی با چگالی نسبی متفاوت استفاده کرده‌اند. همچنین کلاشنیکف² و همکاران [13] در مطالعه‌ای به بررسی ریزساختار اتصالات آلومینیوم 6061 و مس پرداخته‌اند. آنها با اندازه‌گیری سختی ویکرز به مطالعه خواص مکانیکی ترکیبات بین‌فلزی ایجاد شده در حین فرایند پرداخته‌اند. آنها گزارش کرده‌اند که در مقایسه با جوشکاری ذوبی با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، سختی ترکیبات بین فلزی چهار بار کمتر شده است.

در بین روش‌های تولید ساندویچ فوم‌های فلزی اگرچه ساده‌ترین و ارزاترین روش، اتصال چسبی است لیکن مشکلاتی از جمله استحکام پایین و عدم مقاومت در برابر حرارت در این نوع اتصال، استفاده از آن را محدود ساخته است. روش متداول دیگر استفاده از لحیم‌کاری است بالاخص وقتی که استفاده از پانل‌های ساندویچی سبک با ساختار لانه زنبوری³ مد نظر باشد [14]. همچنین روش‌هایی مانند مخلوط کردن پودرهای فوم‌ساز و روش جوش مایع گذرا و جوشکاری‌های لیزر TIG، نیازمند تجهیزات بیشتر و مصرف انرژی بالاتری نسبت به روش جوش اصطکاکی اغتشاشی می‌باشند و در عین حال به دلیل ذات این فرایندها بایستی در حالت مایع انجام شوند که منجر به بروز مشکلات خاص خود به خصوص در جوشکاری آلیاژهای

¹ Peng

² Kalashnikova

³ Honeycomb

⁴ Through-Thickness

نفوذ مناسب و با توجه به آزمون‌های اولیه از زاویه‌های کمتر از 5 درجه صرفنظر شد و دو مقدار 5 و 7 درجه مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین سرعت دورانی ابزار در 3 سطح و زاویه انحراف ابزار در 2 سطح مورد بررسی قرار گرفتند و مجموعاً 6 آزمون جوشکاری انجام شد که جزئیات آن در جدول 2 نشان داده شده است.

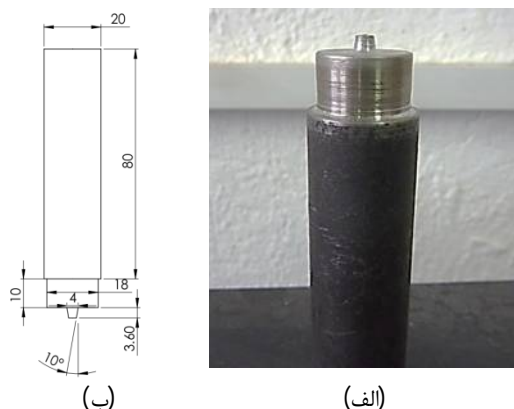


Fig. 2 Welding tool and its dimensions

شکل 2 ابزار جوشکاری و ابعاد آن

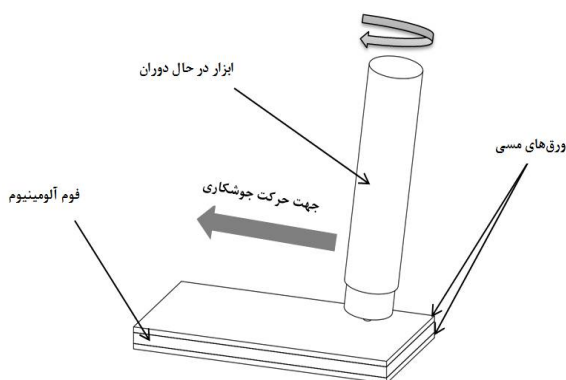


Fig. 3 Schematic of the process

شکل 3 طرح‌واره فرآیند

جدول 2 جدول طراحی آزمایش

Table 2 Design of experiments table

شماره آزمایش	سرعت دورانی ابزار (rpm)	زاویه انحراف (درجه) ابزار (درجه)
1	2000	5
2	2500	5
3	3000	5
4	2000	7
5	2500	7
6	3000	7

پس از جوشکاری، نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM E8M

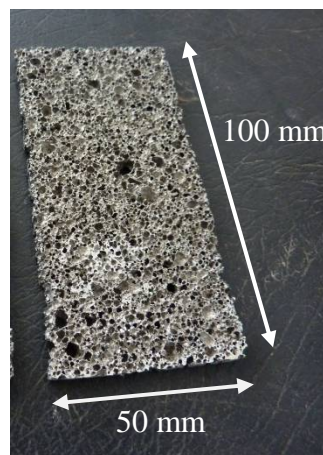


Fig. 1 Used Aluminum foams

شکل 1 فوم‌های آلومینیومی مورد استفاده

جنس ابزار باید به نحوی انتخاب شود که در برابر سایش، مقاوم بوده و خواص خود را در دماهای بالا حفظ کند. لذا ابزار مورد استفاده از فولاد گرم کار H13 تهیه شد. پین ابزار به صورت مخروطی ساده با مقطع دایره طراحی و با ماشینکاری ساخته شد سپس توسط عملیات حرارتی سختی آن تا 52 راکولسی بالا برده شد. ابعاد و شکل ابزار در شکل 2 نشان داده شده است.

جوشکاری با استفاده از یک دستگاه فرز سی‌ان‌سی ساخت ماشین‌سازی تبریز انجام شد. ورق‌ها (فوم آلومینیومی در وسط و ورق‌های مسی در دو طرف) توسط یک قید روی میز دستگاه محکم شد تا در حین جوشکاری با توجه به نیروهای زیادی که در حین فرآیند جوشکاری به قطعات وارد می‌شود، از یکدیگر جدا نشوند. به منظور دستیابی به اتصال مناسب، محور اسپیندل (که ابزار روی آن بسته می‌شود) نسبت به محور عمودی منحرف شد. با روشن شدن دستگاه و شروع حرکت دورانی اسپیندل، پین ابزار در حال دوران تا عمق 4 میلی‌متر در قطعات نفوذ می‌کند. سپس حرکت پیشروی میز شروع شده و ابزار در طول مسیر مستقیم به طول 50 میلی‌متر حرکت می‌کند. سپس قطعه به پشت برگردانده شده و سمت مقابل نیز جوشکاری می‌شود. نمای طرح‌واره فرآیند در شکل 3 نشان داده شده است.

پس از انجام آزمون‌های اولیه، سرعت پیشروی ثابت 20 میلی‌متر در دقیقه برای انجام جوشکاری در نظر گرفته شد. پارامترهای مورد مطالعه سرعت دورانی ابزار و زاویه انحراف ابزار بود. در آزمون‌های اولیه در سرعت‌های پایین‌تر از 2000 دور در دقیقه، جوش از کیفیت ظاهری مطلوبی برخوردار نبود. بنابراین اثر سرعت دورانی در سه سطح 2000، 2500 و 3000 دور در دقیقه مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین به منظور دستیابی به

در واقع در ابتدای مسیر که ابزار به صورت عمودی در ضخامت ورق‌ها نفوذ می‌کند، اثری از شیار نیست و با شروع حرکت خطی این شیار ایجاد شده و رفته رفته به عمق آن افزوده می‌شود. این شیار موجب کاهش استحکام جوش می‌شود.

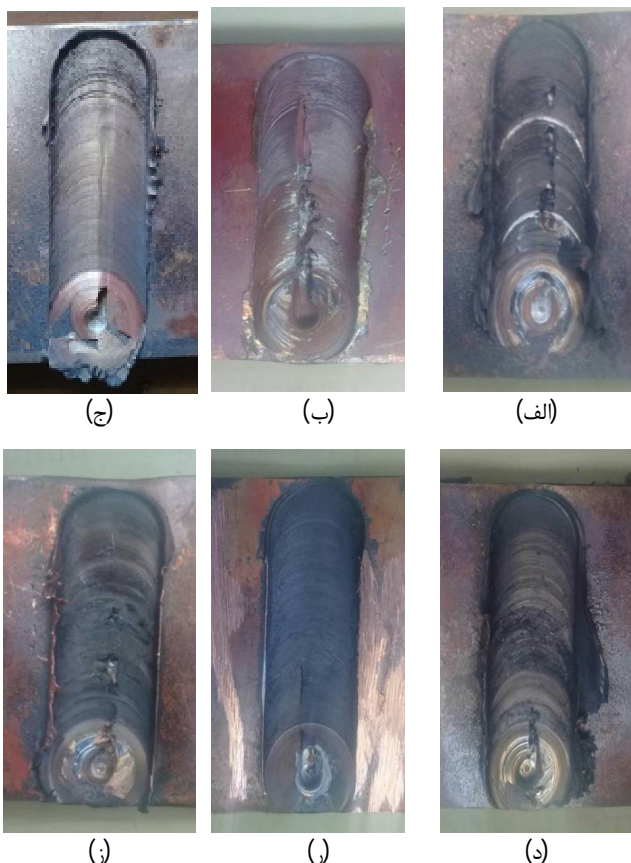


Fig. 5 Appearance of specimen welded in a) 2000 rpm and 5°, b) 2500 rpm and 5°, c) 3000 rpm and 5°, d) 2000 rpm and 7°, e) 2500 rpm and 7°, f) 3000 rpm and 7°

شکل 5 شکل ظاهری جوش تحت شرایط الف) سرعت دورانی 2000 دور در دقیقه و زاویه انحراف 5 درجه، ب) 2500 دور در دقیقه و 5 درجه، ج) 3000 دور در دقیقه و 5 درجه، د) 2000 دور در دقیقه 7 درجه، ر) 2500 دور در دقیقه و 7 درجه، ز) 3000 دور در دقیقه و 7 درجه

در آزمون سوم که با سرعت دورانی 3000 دور در دقیقه و زاویه انحراف 5 درجه جوشکاری شده است (شکل 5-ج) ترک و یا عدم جوش پذیری مشاهده نشد اما چند فرورفتگی نقطه‌ای در اواسط مسیر جوش دیده می‌شود که ناشی از تخلخل نامنظم در فوم آلومینیومی است. این عیوب بر روی استحکام کششی جوش تأثیر منفی دارند. در آزمون چهارم که با سرعت دورانی 2000 دور در دقیقه و زاویه انحراف 7 درجه جوشکاری شده است (شکل 5-د) کیفیت ظاهری جوش از ابتدا تا انتها مناسب بوده و تنها دو فرورفتگی در اواسط مسیر دیده می‌شود که ناشی از تخلخل فوم آلومینیوم است. نمونه جوشکاری شده در آزمون

بوسیله‌ی وایرکات به ابعاد مشخص شده در شکل 4 (الف) برش داده شد و سپس نمونه‌های آماده شده که در شکل 4 (ب) نشان داده شده‌اند توسط دستگاه کشش Zwick/Roell Z600 که حداکثر نیرو در آن 600 کیلو نیوتن است، با سرعت یک میلی‌متر در دقیقه تحت آزمون کشش قرار گرفتند.

3- نتایج و بحث

شکل 5 کیفیت ظاهری این شش نمونه را نشان می‌دهد. آزمون اول که با سرعت دورانی 2000 دور در دقیقه و زاویه انحراف 5 درجه (شکل 4-الف) جوشکاری شده است از کیفیت ظاهری مطلوبی برخوردار است. جوش کاملاً پیوسته بوده و عیوب ظاهری از قبیل ترک و عدم اتصال در آن دیده نمی‌شود. تنها در میانه‌ی مسیر، یک خط در راستای حرکت پین ابزار به صورت اندکی فرورفتگی مشاهده می‌شود. در آزمون دوم که با سرعت دورانی 2500 دور در دقیقه و زاویه انحراف 5 درجه (شکل 5-ب) جوشکاری شده است کیفیت ظاهری در محل اثر شانه ابزار مناسب است اما خط حرکت پین به طور کامل پر نشده و در خط مرکزی جوش فرورفتگی نسبتاً زیادی مشاهده می‌گردد. این فرورفتگی از اواسط مسیر جوش شروع شده و هرچه ابزار به انتهای مسیر نزدیک شده، به عمق آن افزوده شده است. از نحوه ایجاد این شیار می‌توان نتیجه گرفت که حرکت خطی ابزار منجر به ایجاد این شیار می‌شود.

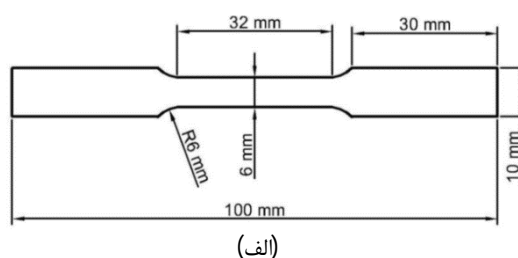


Fig. 4 a) Dimensions of tensile test samples, b) samples prepared for tensile test

شکل 4 (الف) ابعاد نمونه‌های آزمون کشش، ب) نمونه‌های آماده شده برای آزمون کشش

در آزمون دوم (شکل 6-ب) نیز در نزدیکی ناحیه اتصال و در رویه مسی، حفره های ریزی دیده می شود که ناشی از عدم حرارت لازم و در نتیجه عدم نرم شدن مواد است. در آزمون سوم (شکل 6-ج) ترک و حفره کمتر به چشم می خورد. در آزمون چهارم (شکل 6-د) حفره های ریزی در نزدیکی نواحی جوش، هم در رویه مسی و هم در فوم آلومینیوم دیده می شود. اما ترک در این قطعه کمتر دیده شده و در مجموع کیفیت مناسبی دارا می باشد. در آزمون پنجم (شکل 6-ر) ترک های ریزی مشاهده شده که می تواند بر میزان استحکام کششی تأثیرگذار باشد. در آزمون ششم (شکل 6-ز) ترک های بزرگی در رویه مسی دیده می شود که به طور قطع، در میزان استحکام کششی مؤثر خواهد بود. با بررسی میکروسکوپی مقاطع جوش در ناحیه اتصال در شش نمونه، این طور مشاهده شد که عموماً افزایش سرعت دورانی ابزار، موجب افزایش تعداد ترک ها و حفره های مقطع جوش و همچنین افزایش پراکندگی ناهمگن ذرات مس در ناحیه جوش می شود، که این امر موجب کاهش استحکام کششی شده است. نمودار تنش- کرنش این نمونه ها در شکل 7 و استحکام نهایی آنها در شکل 8 نشان داده شده است.

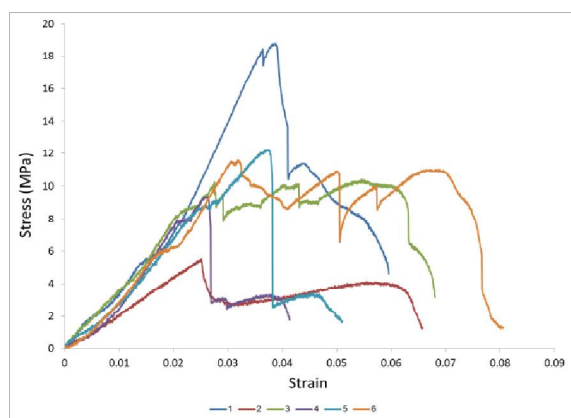


Fig. 7 Stress-strain diagrams of samples

شکل 7 نمودارهای تنش-کرنش نمونه ها

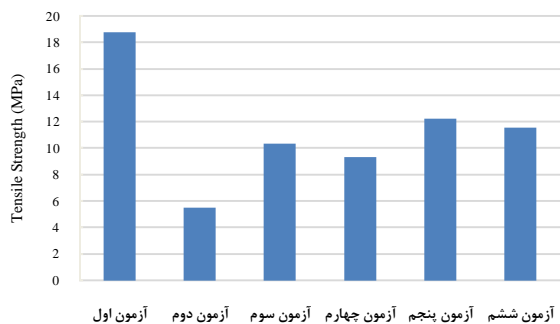


Fig. 8 Tensile strength of samples

شکل 8 استحکام نهایی نمونه ها

پنجم که با سرعت دورانی 2500 دور در دقیقه و زاویه انحراف 7 درجه جوشکاری شده است (شکل 5-ر) مانند جوش شماره یک، از کیفیت ظاهری بسیار مطلوبی برخوردار است و به جز یک خراش در اواخر مسیر، هیچ عیب جوشکاری در ظاهر این جوش دیده نمی شود. در آزمون ششم که با سرعت دورانی 3000 دور در دقیقه و زاویه انحراف 7 درجه (شکل 5-ز) جوشکاری شده است، کیفیت ظاهری جوش در حد متوسطی قرار دارد.

برای بررسی کیفیت جوش، مقاطع عرضی نیز مورد بررسی قرار گرفت. در آزمون اول (شکل 6-الف) مشاهده می شود که در ناحیه مسی اتصال و در نزدیکی نواحی جوش، هم ترک و هم حفره دیده می شود که می تواند ناشی از نفوذ کم ابزار و ایجاد گرمای ناکافی باشد. این عیوب میزان استحکام کششی را به وضوح کاهش می دهد.

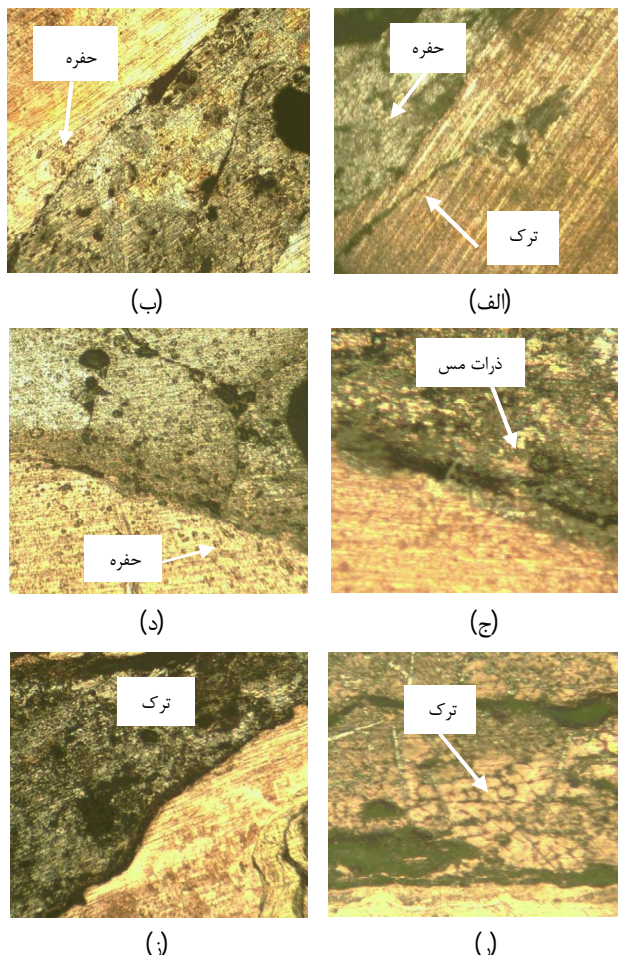


Fig. 6 Optical microscopic images of the weld: a) 2000 rpm and 5°, b) 2500 rpm and 5°, c) 3000 rpm and 5°, d) 2000 rpm and 7°, e) 2500 rpm and 7°, f) 3000 rpm and 7°

شکل 6 تصاویر میکروسکوپ نوری از محل جوش: الف) 2000 دور در دقیقه و 5 درجه، ب) 2500 دور در دقیقه و 5 درجه، ج) 3000 دور در دقیقه و 5 درجه، د) 2000 دور در دقیقه و 7 درجه، ر) 2500 دور در دقیقه و 7 درجه، ز) 3000 دور در دقیقه و 7 درجه

کلی در محدوده مورد مطالعه می‌توان به این نتیجه رسید که سرعت دورانی ابزار اثر بیشتری نسبت به زاویه انحراف دارد و افزایش زاویه انحراف با توجه به افزایش عمق نفوذ منجر به بهبود استحکام می‌شود. در مورد نمونه‌های جوشکاری شده با دور 2000 دور بر دقیقه که خلاف این رویه مشاهده می‌شود به نظر می‌رسد تخلخل نامتقارن فوم در ناحیه آزمایش شده می‌تواند دلیل بروز این اختلاف باشد.

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، بیشترین استحکام کششی مربوط به نمونه شماره 1 بوده که مقدار آن 18/8 مگاپاسکال است. این استحکام بالا حاصل ساختار یکپارچه‌تر و عیوب کمتر در این نمونه است (شکل‌های 5- الف و 6- الف). سرعت دورانی پایین‌تر و زاویه انحراف کمتر ابزار منجر به فشار متعادل‌تر و همچنین دمای پایین‌تر در حین جوشکاری نسبت به سایر نمونه‌ها می‌شود. همچنین کمترین استحکام کششی به ترتیب، مربوط به نمونه‌های 2، 3 و 6 است. نکته مشهود این 3 نمونه در این است که جوش‌های بدست آمده در سرعت‌های دورانی بالای ابزار یعنی 2500 و 3000 دور بر دقیقه بوده‌اند. بنابراین می‌توان گفت که این نتیجه می‌تواند در اثر حرارت بالاتر جوشکاری به علت سرعت بالای دوران ابزار باشد که موجب تشکیل منطقه متأثر از حرارت بزرگتر، ساختار غیر یکپارچه‌تر، ترک‌های کوچک و سایر عیوب می‌شود (شکل‌های 5 و 6- ب، ر، ز).

با محاسبه‌ی سطح زیر نمودارهای تنش- کرنش، چقرمگی نمونه‌ها محاسبه شده و در شکل 10 ارائه شده است. مشاهده می‌شود که بالاترین چقرمگی مربوط به نمونه 6 با مقدار 609/2 کیلوژول بر مترمکعب است که نشان‌دهنده‌ی مقاومت بالاتر این جوش در مقایسه با سایر نمونه‌ها در برابر شروع ترک است. همچنین پایین‌ترین مقدار مربوط به نمونه 4 با مقدار 159/7 کیلوژول بر مترمکعب است که نشان می‌دهد این جوش تردتر از سایر نمونه‌ها بوده و بیشتر مستعد ترک‌خوردگی است. با ترسیم نمودار چقرمگی نمونه‌ها به نسبت سرعت دورانی ابزار، مشاهده می‌شود که در زاویه انحراف 5 درجه با افزایش سرعت دورانی ابزار، چقرمگی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در حالی که در زاویه انحراف 7 درجه، چقرمگی با سرعت دورانی رابطه‌ی کاملاً مستقیم داشته است و با افزایش سرعت دورانی، چقرمگی نیز افزایش پیدا کرده است. در تصاویر میکروسکوپی از مقاطع عرضی نمونه‌ها (شکل 6) نیز مشاهده می‌گردد نمونه‌های 2، 4 و 5 دارای ترک‌های بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشند که این نتیجه با توجه به چقرمگی پایین‌تر در این نمونه‌ها، قابل پیش‌بینی بوده است.

در آزمون اول از شروع آزمون تا رسیدن به تنش تسلیم، نوسان خاصی در نمودار دیده نمی‌شود که حاکی از همگن بودن جوش فوم آلومینیوم به مس در این نمونه می‌باشد. اما در نمونه سوم مشاهده می‌شود که تا تنش 8/5 مگاپاسکال نمودار تقریباً خطی است اما پس از آن نوسانات زیادی در نمودار دیده می‌شود که این نوسانات ناشی از تخلخل فوم آلومینیومی است که موجب تشکیل جوش ناهمگن در این نمونه شده است. در آزمون ششم تا رسیدن به تنش نهایی، شیب نمودار ثابت بوده و تنها یک نوسان در تنش 6 مگاپاسکال دیده می‌شود. اما پس از عبور از تنش نهایی با مقدار 11/6 مگاپاسکال، نمودار دچار نوسانات بسیاری شده که نشان‌دهنده ناهمگن بودن جوش در اثر تخلخل فوم آلومینیوم می‌باشد.

مشاهده می‌شود که در سرعت‌های دورانی 2000 و 2500 دور در دقیقه نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها مشابه قطعه یکپارچه بوده اما در سرعت دورانی 3000 دور در دقیقه نمودار تنش-کرنش دارای نوسانات بسیاری شده است که ناشی از عدم تشکیل ساختار یکنواخت و در نهایت ایجاد یک جوش ناهمگن در اثر سرعت بالای دوران ابزار است.

با ترسیم نمودار استحکام کششی نمونه‌های جوش به نسبت سرعت دورانی ابزار، مشاهده می‌شود که در زاویه انحراف 5 درجه با افزایش سرعت دورانی ابزار، استحکام کششی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد (شکل 9). اما بیشترین استحکام مربوط به نمونه جوشکاری شده با کمترین دور ابزار است. کاهش استحکام کششی عمدتاً ناشی از تشکیل حفره‌های داخلی و ایجاد ترک‌های ریز در ساختار جوش است.

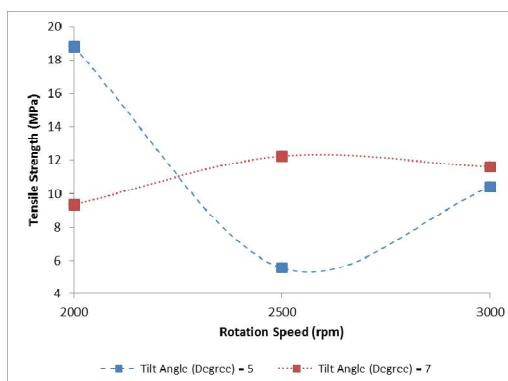


Fig. 9 Tensile strength of samples versus tool rotational speed

شکل 9 نمودار استحکام کششی نمونه‌ها بر حسب سرعت دورانی ابزار

در سرعت دورانی 2000 دور در دقیقه نمونه جوشکاری شده با زاویه انحراف ابزار 5 درجه استحکام بیشتری دارد و این در حالیست که در دو دور بالاتر شرایط معکوس شده است. به طور

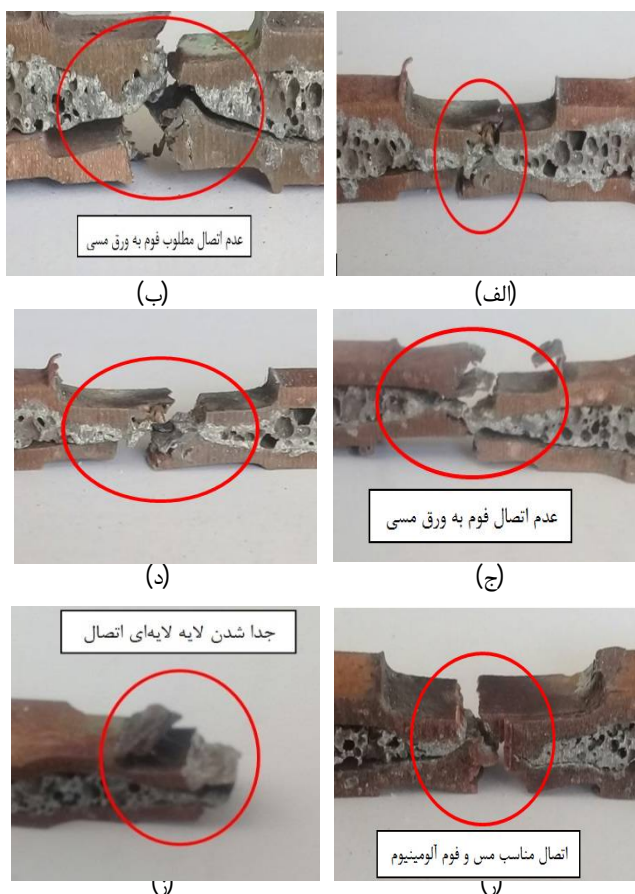


Fig. 11 Cross-section of the samples after tensile test; a) 2000 rpm and 5 degrees, b) 2500 rpm and 5 degrees, c) 3000 rpm and 5 degrees, d) 2000 rpm and 7 degrees, e) 2500 rpm and 7 degrees, f) 3000 rpm and 7 degrees

شکل 11 سطح مقطع نمونه‌ها پس از آزمون کشش: الف) 2000 دور در دقیقه و 5 درجه، ب) 2500 دور در دقیقه و 5 درجه، ج) 3000 دور در دقیقه و 5 درجه، د) 2000 دور در دقیقه و 7 درجه، ر) 2500 دور در دقیقه و 7 درجه، ز) 3000 دور در دقیقه و 7 درجه

در این نمونه در نواحی محل شکست، اتصال نسبتاً مطلوبی از مس و فوم آلومینیومی دیده می‌شود و تا مرحله‌ی شکست نمونه، ورق مسی از فوم جدا نشده است که موجب استحکام کششی نسبتاً مناسبی در این نمونه شده است. شکل 11-ز نحوه شکست نمونه آزمون شماره 6 با پارامترهای سرعت دورانی 3000 دور بر دقیقه و زاویه انحراف 7 درجه را نشان می‌دهد. در این نمونه نیز در نواحی نزدیک به محل شکست، مس با فوم آلومینیوم اتصال مطلوبی نداشته و اتصال به صورت لایه لایه جدا شده است که موجب کاهش استحکام کششی این نمونه شده است.

4- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت و کاربردهای صنعتی فراوان فوم‌ها و ساندویچ‌های فلزی، تولید ساندویچ‌های فلزی ناهمجنس با هسته

در شکل 11 نیز تصاویر نحوه شکست در نمونه‌های حاصل از جوشکاری با شرایط مختلف مشاهده می‌شود. شکل 11-الف نحوه شکست نمونه آزمون شماره 1 با پارامترهای سرعت دورانی 2000 دور در دقیقه و زاویه انحراف 5 درجه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر مشخص است، در جریان آزمون کشش و تا مرحله‌ی شکست نمونه، ورق‌های مسی از فوم آلومینیوم جدا نشده که نشانه‌ی عمق جوش مناسب و استحکام مطلوب این اتصال است. شکل 11-ب نحوه شکست نمونه آزمون شماره 2 با پارامترهای سرعت دورانی 2500 دور در دقیقه و زاویه انحراف 5 درجه را نشان می‌دهد. در این نمونه مشاهده می‌شود در نواحی نزدیک به محل شکست، ورق مسی زیرین، اتصال مطلوبی با فوم آلومینیوم نداشته که همین امر موجب کاهش استحکام کششی این نمونه شده است. شکل 11-ج نحوه شکست نمونه آزمون شماره 3 با پارامترهای سرعت دورانی 3000 دور در دقیقه و زاویه انحراف 5 درجه را نشان می‌دهد. مشابه نمونه دوم در این نمونه هم قسمتی از ورق مسی در بالای فوم آلومینیوم و قسمتی از ورق مسی در روکش زیری آن، اتصال مطلوبی نداشته قبل از شکست از فوم آلومینیوم جدا شده است که تأثیر منفی در استحکام کششی این جوش دارد.

شکل 11-د نحوه شکست نمونه آزمون شماره 4 با پارامترهای سرعت دورانی 2000 دور در دقیقه و زاویه انحراف 7 درجه را نشان می‌دهد. در این نمونه، در یک سمت عدم اتصال کامل ورق مسی به فوم آلومینیوم دیده می‌شود. اما در سمت مقابل اتصال نسبتاً مطلوبی از مس و فوم آلومینیومی مشاهده می‌شود.

شکل 11-ر نحوه شکست نمونه آزمون شماره 5 با پارامترهای سرعت دورانی 2500 دور در دقیقه و زاویه انحراف 7 درجه را نشان می‌دهد.

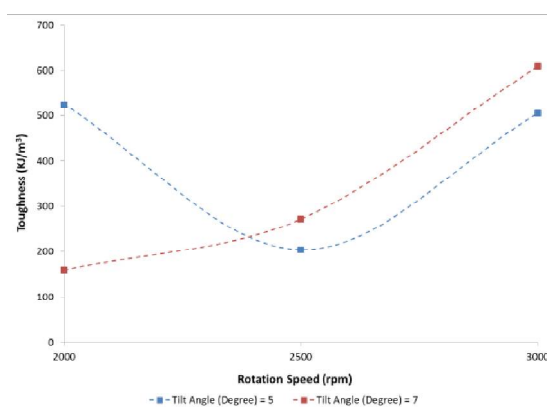


Fig. 10 Toughness of samples versus tool rotational speed

شکل 10 نمودار چقرمگی نمونه‌ها بر حسب سرعت دورانی ابزار

- فوم آلومینیومی و رویه مسی با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مطالعه شد. سرعت دورانی ابزار و زاویه انحراف ابزار پارامترهای مورد بررسی بودند که اثر آنها بر استحکام، کیفیت ظاهری و چقرمگی اتصالات بررسی شد. اصلی ترین نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر است:
- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روشی موفق در اتصال ساندویچ‌های فلزی ناهمجنس با هسته فوم آلومینیومی و رویه مسی است.
 - سرعت دورانی بیش از زاویه انحراف ابزار بر استحکام کششی جوش موثر است.
 - در میان آزمون های انجام شده در این پژوهش، بیشترین استحکام جوش و همچنین بهترین کیفیت ظاهری برای نمونه‌ای حاصل گردید که سرعت دورانی ابزار جوشکاری در آن، 2000 دور بر دقیقه و زاویه انحراف ابزار در آن 5 درجه بوده است.
 - افزایش سرعت دورانی باعث افت کیفیت جوش می‌شود که برای جبران آن می‌توان از زاویه انحراف بیشتر ابزار استفاده نمود.
- 5- مراجع**
- [1] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Templesmith, C. J. Dawes, Friction stir welding, International Patent No. PCT/GB92102203, 1991.
 - [2] W. Woo, L. Balogh, T. Ungár, H. Choo, Z. Feng, Grain structure and dislocation density measurements in a friction-stir welded aluminum alloy using X-ray peak profile analysis, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 498, No. 1-2, pp. 308-313, 2008.
 - [3] S. M. Bayazid, H. Farhangi, A. Ghahramani, Effect of pin profile on defects of Friction Stir Welded 7075 Aluminum alloy, *Procedia Materials Science*, Vol. 11, pp. 12-16, 2015.
 - [4] K. Elangovan, V. Balasubramanian, M. Valliappan, Influences of tool pin profile and axial force on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 38, No. 3-4, pp. 285-295, 2008.
- [5] C. Kádár, P. Kenesei, J. Lendvai, Z. Rajkovits, Energy absorption properties of metal foams, *Materials World*, Vol. 6, No. 1, pp. 140-1586, 2005.
 - [6] C. Yao, Z. Hu, F. Mo, Y. Wang, Fabrication and fatigue behavior of aluminum foam sandwich panel via liquid diffusion welding method, *Metals (Basel)*, Vol. 9, No. 5, p. 582, 2019.
 - [7] M. F. Ashby, T. Evans, N. A. Fleck, J. W. Hutchinson, H. N. G. Wadley, L. J. Gibson, *Metal foams: a design guide*, Elsevier, 2000.
 - [8] J. Banhart, H. Seeliger, Recent trends in aluminum foam sandwich technology, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 14, No. 12, pp. 1082-1087, 2012.
 - [9] Y. Hangai, H. Kamada, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru, N. Yoshikawa, Aluminum alloy foam core sandwich panels fabricated from die casting aluminum alloy by friction stir welding route, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, No. 9, pp. 1928-1934, 2014.
 - [10] J. Nowacki, K. Moraniec, Welding of metallic AlSi foams and AlSi-SiC composite foams, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 940-950, 2015.
 - [11] P. Peng, K. Wang, W. Wang, L. Huang, K. Qiao, Q. Che, X. Xi, B. Zhang, J. Cai, High-performance aluminium foam sandwich prepared through friction stir welding, *Materials Letters*, Vol. 236, pp. 295-298, 2019.
 - [12] M. Nouri Damghani, A. Mohammadzadeh Gonabadi, Improving the Performance of the Sandwich Panel with the Corrugated Core Filled with Metal Foam: Mathematical and Numerical Methods, *Mechanics of Advanced Composite Structures*, Vol. 6, pp. 249-261, 2019.
 - [13] T. A. Kalashnikova, M. A. Shvedov, P. A. Vasilyev, Microstructure evolution in dissimilar AA6060/copper friction stir welded joints, *American Institute of Physics, Conference Proceedings*, Vol. 1909, 2017.
 - [14] Z. Zhang, Q. Zhang, D. Zhang, Y. Li, F. Jin, D. Fang, Enhanced mechanical performance of brazed sandwich panels with high density square honeycomb-corrugation hybrid cores, *Thin-Walled Structures*, Vol. 151, 2020.
 - [15] O. B. Olurin, N. A. Fleck, M. F. Ashby, Deformation and fracture of aluminium foams, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 291, No. 1, pp. 136-146, 2000.