

Experimental Study on Additive Friction Stir Enabled Solid-State Manufacturing for the Repair of Copper

A. Jabbari ^{a*}, A. Baniasadi ^a, E. Soury ^a

^a Department of Manufacturing and Production Engineering, Arak University, Arak, 3848177584, Iran

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Jabbari A, Baniasadi A, Soury E. Experimental Study on Additive Friction Stir Enabled Solid-State Manufacturing for The Repair of Copper. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2024;4(3): 369 – 386.

 <https://10.61186/masm.4.3.369>.

KEYWORDS

Additive friction welding,
Repair of copper parts,
Experimental study,
Mechanical properties,
Metallurgical properties.

ABSTRACT

In this research, the experimental study of the additive friction welding process for the repair of surface defects of copper parts, which are widely used in industry, household appliances, electrical appliances, etc., has been done. Melting methods are commonly used to repair these parts, which cause defects such as hot cracks, thermal stresses, and residual stresses. By using the additive friction welding method, these defects can be prevented during the repair of copper parts. In this research, to repair the surface defects of copper parts, three methods of copper powder injection, the use of thin copper sheet and the use of copper filler to add copper in the welding position during the friction welding process were used and the properties of hardness, strength, crystal structure and the metallographic properties of the weld zone for each method have been studied with the aid of hardness tests, tensile tests, metallography and EDX elemental analysis and SEM images. The results obtained from this research show that the process parameters directly affect the quality and properties of the weld, so that they change the distance between the crystal surfaces and the crystal structure of the weld. In this welding method, due to the friction of the tool and the workpiece, the hardness of the welding surface and the temperature of the welding position increase. The increase in temperature at the interface between the tool and the part is enough to increase the grain size of the part at the welding position.

Extended Abstract

1. Introduction

Nowadays, due to the high cost of raw materials and manufacturing, the repair of surface defects of copper parts is considered as a solution to reduce costs in industries. Normally, fusion welding methods are used for surface repair, which is associated with the possibility of changing the mechanical, physical and chemical properties of the final parts. Due to the increase in temperature at the welding position in melting processes, there is a possibility of parts distortion and their hardness, mechanical strength and metallographic properties are strongly affected. The repair process must be done with strict control of the influencing factors in order to prevent damage to the parts. Since the use of fusion welding methods increases the temperature of the

* Corresponding author. Tel.: +988632625732

E-mail address: a-jabbari@araku.ac.ir

DOI: <https://10.61186/masm.4.3.369>.

Received: July 17, 2024; Received in revised form: November 02, 2024; Accepted: November 16, 2024.

© Author



part, it is possible to change the shape of the part and create mechanical and metallographic defects in it. Additive friction welding process is proposed as a new method to repair the surface defects of copper parts to reduce the possibility of defects in the part. Using this method creates less heat in the welding position and results in less environmental pollution. Therefore, in this research, the possibility of repairing the surface defects of copper parts using the additive friction welding method is discussed, and the effect of the effective parameters of the process on the mechanical and metallurgical properties of the parts is studied experimentally. Three methods have been used to add metal to the welding position in the additive friction welding process. In the first method, the powder of copper particles is injected at the welding site. In the second method, a thin copper sheet is used at the interface between the tool and the piece. In the third method, a copper filler is used to repair the part surface in the additive friction welding process. After the welding process, samples are cut from the welding position and their mechanical properties such as hardness and mechanical strength are measured and compared with the corresponding values for the base metal. Also, the metallographic properties of the welding position are studied by ESM and EDX methods.

In the current situation, due to the increase in the costs of manufacturing and producing parts, as well as the costs of raw materials and environmental conditions, this result was achieved in order to take necessary measures to reduce the costs of construction. To solve this issue, it is necessary to repair the used parts and improve the repair methods and use the methods that have less environmental pollution. One of the methods with low environmental pollution is the use of friction welding method, which is used in the connection of aluminum parts and its alloys and the connection of non-homogeneous metals and reaching the appropriate diameter of the tool in friction welding by Griffis and his colleagues [1] by means of consumable and non-consumable tools. consumption has been studied. In this research, the friction method was used to repair the copper parts and the advantage of the friction method over the melting methods, such as preventing the deformation of the parts due to high temperature, has been confirmed, so that this reduces the residual stresses and hot cracks. Will be Friction welding repair was investigated by Sidi et al. [2] and the researchers achieved a weld with a surface quality of 45 micrometers. In the studies conducted by Mr. Meng et al. [3], butt friction welding method is mentioned, and friction and friction stir welding method was investigated by Mr. Khodabakhshi et al. [4]. Achieving the appropriate rotational speed and tool forms has been investigated by Kam et al. [5].

In [7] the basics of stir welding, including thermal history and metal flow, are explained before discussing how process parameters affect weld microstructure and the potential for bubble defects. After introducing the macroscopic features, the microstructural development and related hardness distribution are investigated in detail for two classes of aluminum alloys (non-heat-treatable and heat-treatable). Finally, the range of mechanical properties that can be achieved is discussed, including consideration of residual stress, fracture, fatigue and corrosion. It is shown that FSW of aluminum is becoming a mature technology with applications. There are many businesses.

In [8], rolled AA2219 plates of 7.8 mm thickness were successfully filled friction stir welds without keyholes using semi-consumable tooling. The effect of tool geometric parameters and immersion speed on the mechanical properties of the joint was investigated. A detailed microstructure was observed, especially at the interface. The results showed that the use of the AA7075 bit is able to effectively reduce the drop bit material. During the tensile tests, the ultimate tensile strength and elongation of the joint were 179.6 MPa and 13.7%, respectively, which were equivalent to 96.6% and 99% of the friction stir welding without defects.

In [9], friction stir welding was developed to solve the presence of a large gap in the interface between two workpieces. With a self-designed tool system with an external fixed shoulder, this method is successfully used to weld 6061-T6 aluminum alloy with a thickness of 4 mm, while 2024-T4 aluminum alloy is selected as the compensating material. Fixed shoulder tool system is more suitable for this method. The resulting joints without defects are obtained using a fixed comb, when the width of the tape varies from 1 mm to 2 mm. For the VCFSW process, it is beneficial to increase the rotation speed and decrease the welding speed to break the compensation strip into pieces to obtain a higher quality weld joint.

In [10], the tungsten gas arc welding repair process and the friction stir welding hybrid repair process have been studied to remove the large size groove defect formed during FSW. Experimental results show that the groove defect can be eliminated by both repair processes. The tensile strength of the GTAW repair joint is only 55% of that of the base metal. Tensile fracture occurs in the transition zone between the weld zone and the heat-affected zone, and the fracture surface of the repair joint is characterized by obvious brittleness. In contrast, the GTAW+FSW hybrid repair joint has a high tensile strength of 70% of the base metal. Tensile failure occurs in the

mechanically heat-affected area of the overlap between two FSW pieces, and the fracture characteristic of the hybrid repair joint is partially plastic and brittle.

In [11], TWBs of AA2024-T3 and AA7075-T6 aluminum were prepared and welded using friction stir welding (FSW) method under various conditions, including three different tool shapes as conical, cylindrical, and square under various traverse speeds and rotational speeds.

In this research, the experimental study of the additive friction welding process for the repair of surface defects of copper parts has been done. If melting methods are used to repair these parts, defects such as hot cracks, thermal stresses and residual stresses will occur. By using the additive friction welding method, these defects can be prevented during the repair of copper parts. In this research, to repair the surface defects of copper parts, three methods of copper powder injection, the use of thin copper sheet and the use of copper filler to add copper in the welding position during the friction welding process were used and the properties of hardness, strength, crystal structure and The metallographic properties of the welding area for each method have been studied with the help of hardness tests, tensile tests, metallography and EDX elemental analysis and preparation of SEM images. The results obtained from this research show that the process parameters directly affect the quality and properties of welding, so that they change the distance between the crystal plates and the crystal structure of the welding place. In this welding method, due to the friction of the tool and the workpiece, the hardness of the welding surface and the temperature of the welding position increase. The increase in temperature at the interface between the tool and the part is enough to increase the grain size of the part at the welding position.

2. Experimental investigation of the additive friction welding process

Figure 1 shows the setup and tools used for the experimental study of the effect of the additive friction welding process on repaired copper parts. As seen in Figure 1-a, the friction welding process is performed on the NC vertical milling machine. The workpiece is installed in the clamp of the machine and the tool on the spindle of the machine. Figure 1-b shows the tool used in this process and its components in an exploded view. In this research, copper with a purity of 99.8% was used as the base metal and the experiments were conducted in three groups. In the first group, copper rebar is used as an electrode to fill surface defects. In the second group, thin copper sheet is used to fill surface defects. In the third group, copper powder is used to fill the surface defects so that during the friction process, it is injected into the welding place using a special tool. In these three test groups, the rotational and forward speeds and the number of steps are the same and according to the values in Table 1.



Figure 1. Friction welding process with copper sheet

Table 1. Values of process parameters

| Parameter | Value | Unit |
|-------------------------------------------------------|-------|--------|
| Spindle rotational speed | 1600 | 1/min |
| The time required for the initial temperature to rise | 3.6 | s |
| Vertical advance to feed the electrode | 2 | mm/min |
| Horizontal advance | 15 | mm/min |

In the second group of friction welding by adding a copper sheet with a thickness of 1 mm to repair the defects, experiments have been carried out with two methods of linear and point advancement. Figure 2-a shows the image of friction welding with the linear advancement of the tool. In figure 2-b, the advancement of the tool is done perpendicular to the surface of the part and in a point way. A sheet with less thickness does not have the necessary strength during the friction welding process, and a sheet with more thickness prevents better heat transfer and increases the machining volume. The appearance of the tool in the vertical advancement method is circular and in the horizontal advancement method it is a completely smooth and high-quality surface that does not require re-machining.



Figure 2. Tool advancement methods in copper thin sheet welding process. (a) horizontal advance, (b) vertical advance.

In the third group of friction welding, copper powder with dimensions of 75 microns is used as an additive to repair defects. In this method, in order to inject the powder to the welding position, a tool with a larger diameter is used. To prepare the tool in this process, first the outlet valve is closed and the chamber is filled with copper powder, and then the piston, spring, and cap are placed inside the chamber, and its screw is tightened until the spring is compressed sufficiently, and the tool is installed on the spindle of the machine. During the welding process, as soon as the tool contacts the surface of the workpiece and creates friction and reaches sufficient temperature, by stopping the spindle rotation and opening the powder injection valve, the spindle starts rotating again and the welding process continues until it is completed. During the welding process, it is necessary to continue to advance until the welding line is completed to avoid blocking the injection path. In the conducted tests, the diameter of the powder injection nozzle is 2 mm. In Figure 3, three types of surface defects are considered for copper parts, and for each defect, two friction welding samples are prepared by adding copper powder at the welding position. Figure 4 shows the parts with three types of surface defects after welding.

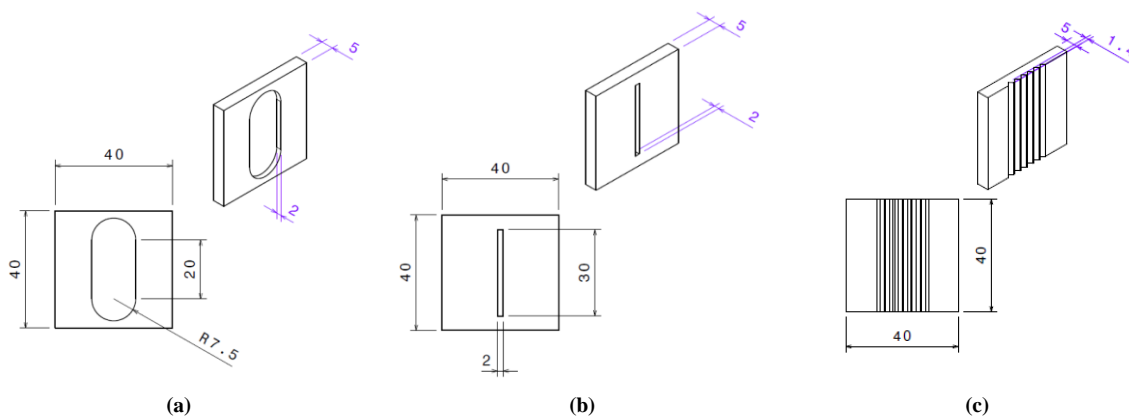


Figure 3. Geometric model of the samples prepared for the powder injection process. (a) low depth and high width, (b) low depth and low width, (c) surface scratches.

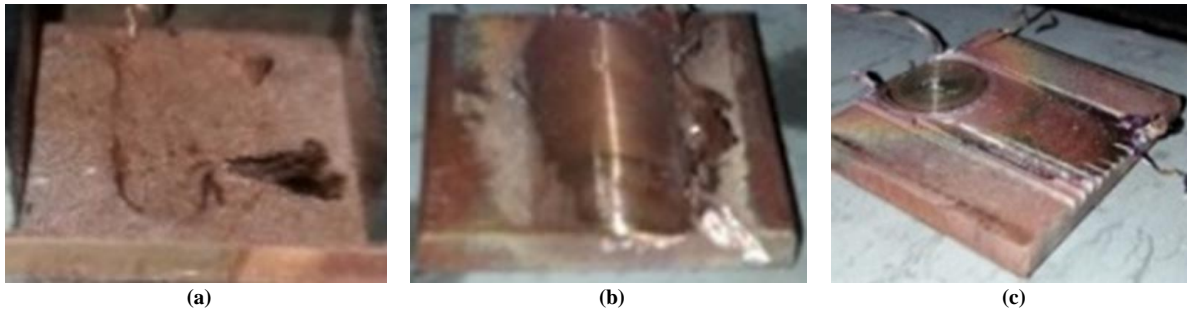


Figure 4. Image of welded parts after powder injection. (a) low depth and high width, (b) low depth and low width, (c) surface scratches.

In order to evaluate the mechanical and metallurgical properties of the welded parts, tensile test, hardness test, SEM, EDX and surface roughness were performed and XRD changes of the samples were investigated. These examples are shown in Figure 5.



Figure 5. Prototypes for experiments.

3. Results and discussion

In order to determine the mechanical properties of the welding area and compare the results with the corresponding values of the base metal, a hardness test has been performed first. Examining the results shows that the hardness of the welding position after the friction welding process by adding copper powder has reached HV 142 and after the welding process using thin copper sheet has reached HV 108. This is while the hardness of the base metal is HV110. In Figure 6, the force-displacement diagram for the base metal, the welding sample with the addition of copper sheet and the welding sample with copper powder injection are compared.

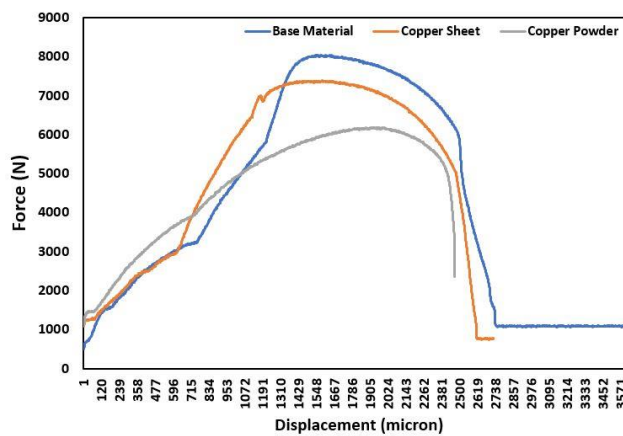


Figure 6. Comparison diagram of tensile strength of welds (force-displacement), vertical axis force in newton meters - horizontal axis micron displacement.



بررسی تجربی جوشکاری اصطکاکی افزودنی جهت ترمیم عیوب سطحی قطعات مسی

علی جباری الف*، علی بنی اسدی ب، احسان سوری ج

الف دانشیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، a-jabbari@araku.ac.ir

ب دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، Baniasadi.a@arpc.ir

ج استادیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، e-soury@araku.ac.ir

| چکیده | واژگان کلیدی |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>در این پژوهش، به مطالعه تجربی فرآیند جوشکاری اصطکاکی افزودنی برای ترمیم عیوب سطحی قطعات مسی که کاربرد وسیعی در صنعت، لوازم خانگی، لوازم الکتریکی و... دارند، پرداخته شده است. به طور متداول از روش‌های ذوبی برای ترمیم این قطعات استفاده می‌شود که عیوبی نظیر ترک گرم، تنش‌های حرارتی و تنش‌های پسماند را در پی دارند. با استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی افزودنی می‌توان از پیدایش این عیوب به هنگام ترمیم قطعات مسی جلوگیری کرد. در این پژوهش، برای ترمیم عیوب سطحی قطعات مسی، از سه روش تزریق پودر مس، استفاده از ورق نازک مسی و استفاده از فیلر مسی برای افزودن مس در موضع جوشکاری در حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی استفاده شده و خواص سختی، استحکام، ساختار کریستالی و خواص متالوگرافی ناحیه جوشکاری برای هر روش به ترتیب با کمک آزمایش‌های سختی سنجی، کشش، متالوگرافی و آنالیز عنصری EDX و تهیه تصاویر SEM مطالعه شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که پارامترهای فرآیندی به طور مستقیم بر روی کیفیت و خواص جوشکاری تأثیر می‌گذارند، به طوری که فاصله صفحات کریستالی و ساختار کریستالی محل جوشکاری را تغییر می‌دهند. در این روش جوشکاری به دلیل اصطکاک ابزار و قطعه کار، سختی سطح جوشکاری و دمای موضع جوشکاری افزایش می‌یابد. افزایش دما در فصل مشترک ابزار و قطعه به اندازه‌ای است که رشد دانه‌بندی قطعه در موضع جوشکاری را به همراه خواهد داشت.</p> | <p>جوشکاری اصطکاکی افزودنی، ترمیم قطعات مسی، مطالعه تجربی، خواص مکانیکی، خواص متالوگرافی.</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۷</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۶</p> |

۱- مقدمه

امروزه به دلیل هزینه بالای مواد اولیه و ساخت، ترمیم عیوب سطحی قطعات مسی به عنوان راهکاری برای کاهش هزینه در صنایع به شمار می‌رود. به‌طور معمول از روش‌های جوشکاری ذوبی برای ترمیم سطحی استفاده می‌شود که با احتمال تغییر خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی قطعات نهایی همراه است. به دلیل افزایش دما در موضع جوشکاری در فرآیندهای ذوبی، امکان اعوجاج قطعات وجود دارد و سختی، استحکام مکانیکی و خواص متالوگرافی آن‌ها به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. فرآیند ترمیم باید با کنترل دقیق عوامل تأثیرگذار انجام شود به طوری که از ایجاد آسیب در قطعات جلوگیری شود. از آنجاکه استفاده از روش‌های جوشکاری ذوبی باعث بالا رفتن دمای قطعه می‌شود، امکان تغییر شکل قطعه و ایجاد عیوب مکانیکی و متالوگرافی در آن وجود دارد. فرآیند جوشکاری اصطکاکی افزودنی به عنوان روشی نوین برای ترمیم عیوب سطحی قطعات مسی پیشنهاد می‌شود تا از احتمال ایجاد عیوب در قطعه کاسته شود. بهره‌گیری از این روش حرارت کمتری در موضع جوشکاری ایجاد می‌کند و از نظر

زیست محیطی آلودگی کمتری در پی دارد. لذا در این پژوهش به امکان سنجی ترمیم عیوب سطحی قطعات مسی با استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی افزودنی پرداخته می‌شود و تأثیر پارامترهای مؤثر فرآیند بر خواص مکانیکی و متالورژیکی قطعات به صورت تجربی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای افزودن فلز در موضع جوشکاری در فرآیند جوشکاری اصطکاکی افزودنی از سه روش استفاده شده است. در روش اول پودر ذرات مس در محل جوشکاری تزریق می‌شود. در روش دوم از یک ورق نازک مسی در فصل مشترک ابزار و قطعه استفاده می‌شود. در روش سوم، یک فیلر مسی برای ترمیم سطح قطعه در فرآیند جوشکاری اصطکاکی افزودنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از انجام فرآیند جوشکاری، نمونه‌هایی از موضع جوشکاری برش داده می‌شوند و خواص مکانیکی آن‌ها نظیر سختی و استحکام مکانیکی آن‌ها اندازه‌گیری و با مقادیر متناظر برای فلز پایه مقایسه می‌شوند. همچنین خواص متالوگرافی موضع جوشکاری با روش ESM و EDX مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

در شرایط کنونی با توجه به بالا رفتن هزینه‌های ساخت و تولید قطعات و همچنین هزینه‌های مربوط به مواد اولیه و شرایط زیست محیطی، این نتیجه حاصل شد تا نسبت به کم کردن هزینه‌های ساخت اقدامات لازم به عمل آورده شود. برای حل این موضوع باید نسبت به ترمیم قطعات مستعمل و بهبود روش‌های ترمیم اقدام نمود و از روش‌هایی که داری آلودگی زیست محیطی کمتری هستند استفاده نمود. یکی از روش‌های دارای آلودگی زیست محیطی کم، استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی می‌باشد که در اتصال قطعات آلومینیومی و آلیاژهای آن و اتصال فلزات غیر هم جنس و رسیدن به قطر مناسب ابزار در جوشکاری اصطکاکی توسط گریفیس و همکارانش [۱] به وسیله دو ابزار مصرفی و غیر مصرفی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحقیق به منظور ترمیم قطعات مسی از روش اصطکاکی استفاده شده و مزیت روش اصطکاکی نسبت به روش‌های ذوبی، نظیر جلوگیری از تغییر شکل قطعات در اثر دمای بالا مورد تأیید قرار گرفته است، به طوری که این امر باعث کاهش تنش‌های پسماند و ترک‌های گرم می‌شود. ترمیم با روش جوشکاری اصطکاکی توسط سیدی و همکاران [۲] مورد بررسی قرار گرفت و محققان به جوش با کیفیت سطح ۴۵ میکرومتر دست یافتند. در مطالعات انجام شده توسط آقای منگ و همکاران [۳] به روش جوشکاری اصطکاکی لب به لب اشاره شده است و جوشکاری به روش اصطکاکی و اصطکاکی اغتشاشی توسط آقای خدابخشی و همکاران [۴] بررسی شده است. رسیدن به سرعت دورانی مناسب و فرم‌های ابزار توسط کام و همکاران [۵] مورد بررسی قرار گرفته است.

در [۶] رسوب اغتشاشی اصطکاکی افزودنی معرفی و مورد بحث قرار گرفته است که فرآیندی سریع، مقیاس پذیر و حالت جامد است و منجر به ریزساختارهای تصفیه شده می‌شود. در [۷] اصول اولیه جوشکاری اغتشاشی، از جمله تاریخچه حرارتی و جریان فلز، قبل از بحث در مورد اینکه چگونه پارامترهای فرآیند بر ریزساختار جوش و احتمال عیوب حباب تأثیر می‌گذارند، توضیح داده می‌شوند. پس از معرفی ویژگی‌های ماکروسکوپی، توسعه ریزساختاری و توزیع سختی مرتبط با جزئیات برای دو کلاس آلیاژ آلومینیوم (غیر قابل عملیات حرارتی و عملیات حرارتی) بررسی می‌شود. در نهایت، طیف وسیعی از خواص مکانیکی که می‌توان به دست آورد مورد بحث قرار می‌گیرد، از جمله در نظر گرفتن تنش پسماند، شکست، خستگی و خوردگی نشان داده است که FSW آلومینیوم در حال تبدیل شدن به یک فناوری بالغ با کاربردهای تجاری متعدد است.

در [۸] صفحات نورد شده AA2219 به ضخامت ۷/۸ میلی‌متر با موفقیت با استفاده از ابزار نیمه مصرفی، جوش داده شده اصطکاکی اغتشاشی را بدون سوراخ کلید پر کردند. تأثیر پارامترهای هندسی ابزار و سرعت غوطه‌وری بر روی خواص مکانیکی اتصال مورد بررسی قرار گرفت. ریزساختار مفصل، به ویژه در سطح مشترک، مشاهده شد. نتایج نشان داد که استفاده از بیت AA7075 قادر به کاهش مؤثر مواد ریزش است. در طول آزمایش‌های کششی، حداکثر استحکام کششی نهایی و ازدیاد طول اتصال به ترتیب ۱۷۹/۶ مگاپاسکال و ۱۳/۷ درصد بود که معادل ۹۶/۶ درصد و ۹۹ درصد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بدون نقص بود.

در [۹] جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی برای رفع وجود شکاف بزرگ در سطح مشترک بین دو قطعه کار توسعه داده شد. با یک سیستم ابزار خود طراحی با شانه ثابت خارجی، این روش با موفقیت برای جوشکاری آلیاژ آلومینیوم T6-۶۰۶۱ با ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده می‌شود، در حالی که آلیاژ آلومینیوم T4-۲۰۲۴ به عنوان ماده جبران کننده انتخاب می‌شود. سیستم ابزار شانه ثابت برای در این روش مناسب تر است. اتصالات حاصل بدون نقص با استفاده از شانه ثابت، زمانی به دست می‌آیند که عرض نوار

از ۱ میلی‌متر تا ۲ میلی‌متر متغیر باشد. برای فرآیند VCFSW، افزایش سرعت چرخش و کاهش سرعت جوشکاری برای شکستن نوار جبرانی به قطعات برای به دست آوردن اتصال جوش با کیفیت بالاتر مفید است.

در [۱۰] فرآیند تعمیر جوشکاری قوسی گاز تنگستن و فرآیند تعمیر هیبریدی جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی برای حذف نقص شیار اندازه بزرگ تشکیل شده در طول FSW مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که نقص شیار را می‌توان با هر دو فرآیند تعمیر حذف کرد. استحکام کششی اتصال تعمیری GTAW تنها ۵۵ درصد نسبت به فلز پایه است. شکست کششی در ناحیه انتقال بین ناحیه جوش و ناحیه متأثر از حرارت رخ می‌دهد و سطح شکستگی اتصال تعمیری با شکندگی واضح مشخص می‌شود. در مقابل، اتصال تعمیر هیبریدی GTAW+FSW دارای استحکام کششی بالایی معادل ۷۰ درصد فلز پایه است. شکست کششی در ناحیه تحت تأثیر حرارت مکانیکی همپوشانی بین دو قطعه FSW رخ می‌دهد و ویژگی شکستگی مفصل ترمیم هیبریدی تا حدی پلاستیک و شکننده است.

در [۱۱]، TWB های آلومینیوم AA7075-T6 و AA2024-T3 با استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) در شرایط مختلف، از جمله سه شکل مختلف ابزار مخروطی، استوانه‌ای و مربعی تحت سرعت‌های پیشروی و سرعت‌های چرخشی مختلف، تهیه و جوش داده شدند.

در این پژوهش، به مطالعه تجربی فرآیند جوشکاری اصطکاکی افزودنی برای ترمیم عیوب سطحی قطعات مسی پرداخته شده است. در صورتی که از روش‌های ذوبی برای ترمیم این قطعات استفاده شود، عیوبی نظیر ترک گرم، تنش‌های حرارتی و تنش‌های پسماند به وجود می‌آید. با استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی افزودنی می‌توان از پیدایش این عیوب به هنگام ترمیم قطعات مسی جلوگیری کرد. در این پژوهش، برای ترمیم عیوب سطحی قطعات مسی، از سه روش تزریق پودر مس، استفاده از ورق نازک مسی و استفاده از فیلمر مسی برای افزودن مس در موضع جوشکاری در حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی استفاده شده و خواص سختی، استحکام، ساختار کریستالی و خواص متالوگرافی ناحیه جوشکاری برای هر روش به ترتیب با کمک آزمایش‌های سختی سنجی، کشش، متالوگرافی و آنالیز عنصری EDX و تهیه تصاویر SEM مطالعه شده است. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که پارامترهای فرآیندی به‌طور مستقیم بر روی کیفیت و خواص جوشکاری تأثیر می‌گذارند، به طوری که فاصله صفحات کریستالی و ساختار کریستالی محل جوشکاری را تغییر می‌دهند. در این روش جوشکاری به دلیل اصطکاک ابزار و قطعه کار، سختی سطح جوشکاری و دمای موضع جوشکاری افزایش می‌یابد. افزایش دما در فصل مشترک ابزار و قطعه به اندازه‌ای است که رشد دانه‌بندی قطعه در موضع جوشکاری را به همراه خواهد داشت.

۲- بررسی تجربی فرآیند جوشکاری اصطکاکی افزودنی

در شکل ۱ ستاپ و ابزار مورد استفاده برای مطالعه تجربی تأثیر فرآیند جوشکاری اصطکاکی افزودنی بر قطعات مسی ترمیم شده نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱-الف ملاحظه می‌شود، فرآیند جوشکاری اصطکاکی روی دستگاه فرز عمودی NC انجام می‌شود. قطعه کار در گیره دستگاه و ابزار بر روی اسپیندل ماشین نصب می‌شود. در شکل ۱-ب ابزار مورد استفاده در این فرآیند و اجزای آن در نمای انفجاری نمایش داده شده است. در این پژوهش از مس با درجه خلوص ۹۹/۸ درصد به‌عنوان فلز پایه استفاده شده و آزمایش‌ها در سه گروه انجام شده است. در گروه اول از میلگرد مسی به‌عنوان الکتروود جهت پر نمودن عیوب سطحی استفاده شده است. در گروه دوم از ورق نازک مسی جهت پر نمودن عیوب سطحی استفاده شده است. در گروه سوم از پودر مس جهت پر نمودن عیوب سطحی استفاده شده به طوری که در زمان فرآیند اصطکاکی با استفاده از ابزار مخصوص به محل جوشکاری تزریق می‌گردد. در این سه گروه آزمایش سرعت دورانی و پیشروی و تعداد مراحل یکسان و مطابق مقادیر جدول ۱ می‌باشند.

جدول ۱ مقادیر پارامترهای فرآیند

| واحد | مقدار | پارامتر |
|--------|-------|-------------------------------------|
| 1/min | ۱۶۰۰ | سرعت دورانی اسپیندل |
| s | ۳/۶ | زمان لازم برای بالا رفتن دمای اولیه |
| mm/min | ۲ | پیشروی عمودی جهت تغذیه الکتروود |



(ب)



(الف)

شکل ۱ فرآیند جوشکاری اصطکاکی با ورق مسی

در گروه دوم جوشکاری اصطکاکی با افزودن ورق مسی به ضخامت ۱ میلی‌متر جهت ترمیم عیوب، آزمایش‌ها با دو روش پیشروی خطی و نقطه‌ای انجام شده است. در شکل ۲-الف تصویر جوشکاری اصطکاکی با پیشروی خطی ابزار نشان داده شده است. در شکل ۲-ب پیشروی ابزار عمود بر سطح قطعه و به صورت نقطه‌ای انجام شده است. ورق با ضخامت کمتر در زمان فرآیند جوشکاری اصطکاکی از استحکام لازم برخوردار نیست و ورق با ضخامت بیشتر نیز از انتقال حرارت بهتر جلوگیری می‌کند و حجم ماشین‌کاری را افزایش می‌دهد. اثر ظاهری ابزار در روش پیشروی عمودی به صورت دایره‌ای و در روش پیشروی افقی به صورت یک سطح کاملاً صاف و با کیفیت می‌باشد که نیاز به ماشین‌کاری مجدد ندارد.



(ب)

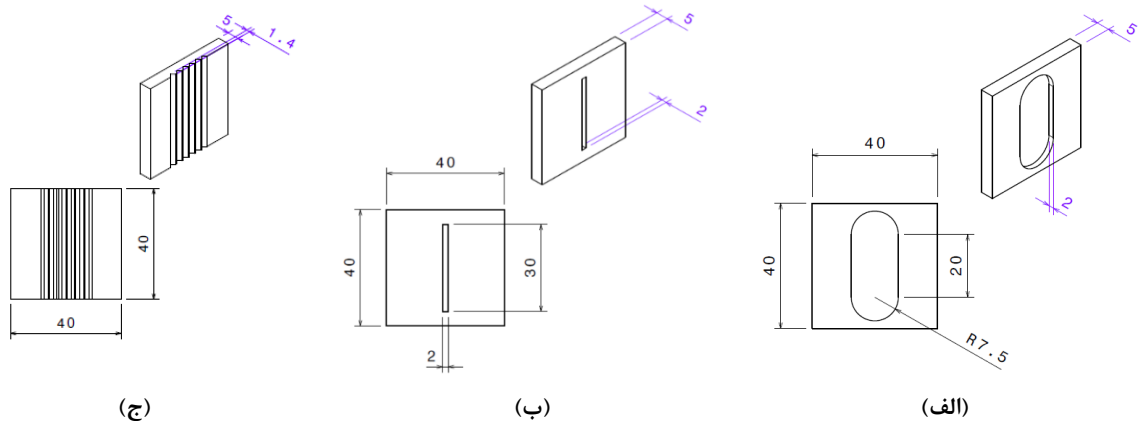


(الف)

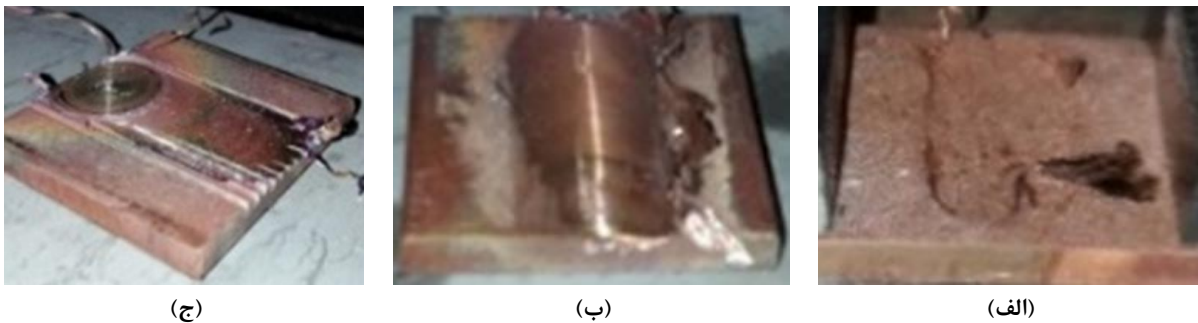
شکل ۲ روش‌های پیشروی ابزار در فرآیند جوشکاری با کمک ورق نازک مسی. الف) پیشروی افقی، ب) پیشروی عمودی.

در گروه سوم جوشکاری اصطکاکی از پودر مس با ابعاد ۷۵ میکرون به عنوان ماده افزودنی برای ترمیم عیوب استفاده شده است. در این روش به منظور تزریق پودر به موضع جوشکاری، از ابزار با قطر بزرگ‌تر استفاده شده است. برای آماده‌سازی ابزار در این فرآیند، ابتدا شیر خروجی بسته و محفظه از پودر مس پر می‌شود و سپس پیستون و فنر و درپوش درون محفظه قرار داده شده و پیچ آن تا فشردگی فنر به اندازه کافی محکم و ابزار روی اسپیندل دستگاه نصب می‌شود. در حین فرآیند جوشکاری، به محض تماس ابزار با سطح قطعه کار و ایجاد اصطکاک و رسیدن به دمای کافی، با متوقف نمودن دوران اسپیندل و باز کردن

شیر تزریق پودر، مجدداً اسپیندل شروع به دوران می‌کند و ادامه فرآیند جوشکاری تا تکمیل آن انجام می‌شود. در حین فرآیند جوشکاری لازم است برای جلوگیری از مسدود شدن مسیر تزریق، پیشروی تا تکمیل خط جوش ادامه داشته باشد. در آزمایش‌های انجام شده، قطر نازل تزریق پودر ۲ میلی‌متر لحاظ شده است. در شکل ۳، سه نوع عیب سطحی برای قطعات مسی در نظر گرفته شده و برای هر عیب، دو نمونه جوشکاری اصطکاکی با افزودن پودر مس در موضع جوش تهیه شده است. در شکل ۴ تصویر قطعات با سه نوع عیب سطحی پس از عملیات جوشکاری نشان داده شده است.



شکل ۳ مدل هندسی نمونه‌های آماده‌شده برای فرآیند تزریق پودر. (الف) عمق کم و عرض زیاد، (ب) عمق کم و عرض کم، (ج) خراش‌های سطحی.



شکل ۴ تصویر قطعات جوشکاری شده پس از تزریق پودر. (الف) عمق کم و عرض زیاد، (ب) عمق کم و عرض کم، (ج) خراش‌های سطحی.

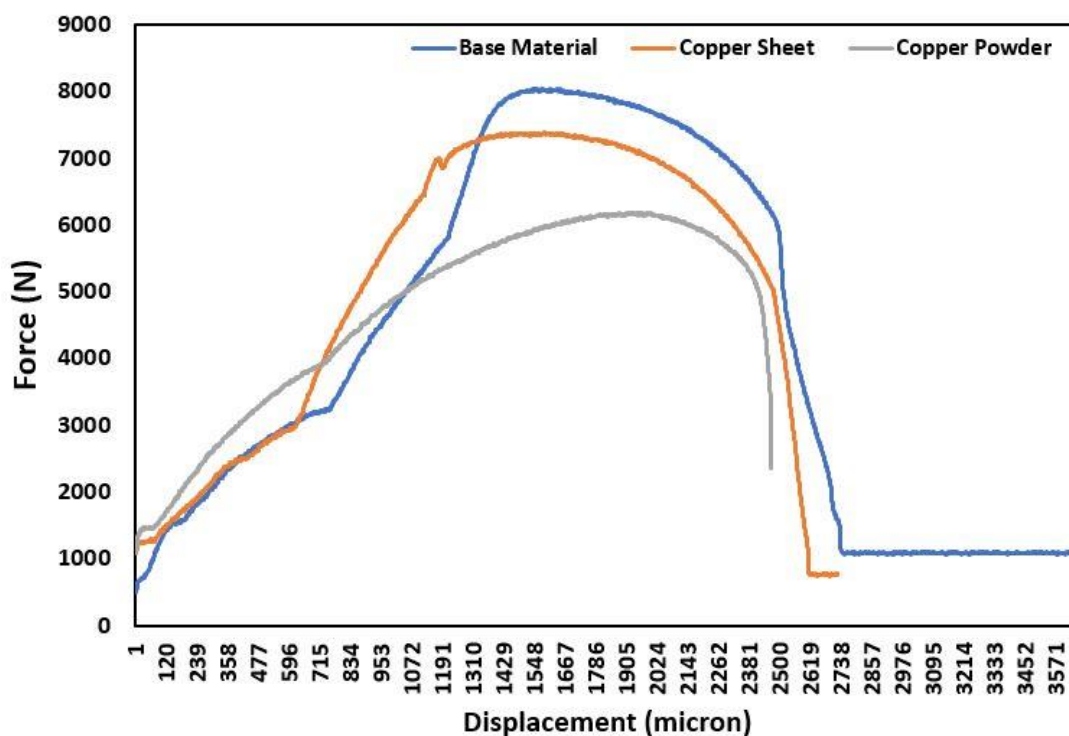


شکل ۵ نمونه‌های اولیه جهت انجام آزمایش‌ها.

به منظور ارزیابی خواص مکانیکی و متالورژیکی قطعات جوشکاری شده، از آزمون کشش، سختی‌سنجی، SEM، EDX و زبری سطح انجام شد و تغییرات XRD نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. این نمونه‌ها در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند.

نتایج و بحث

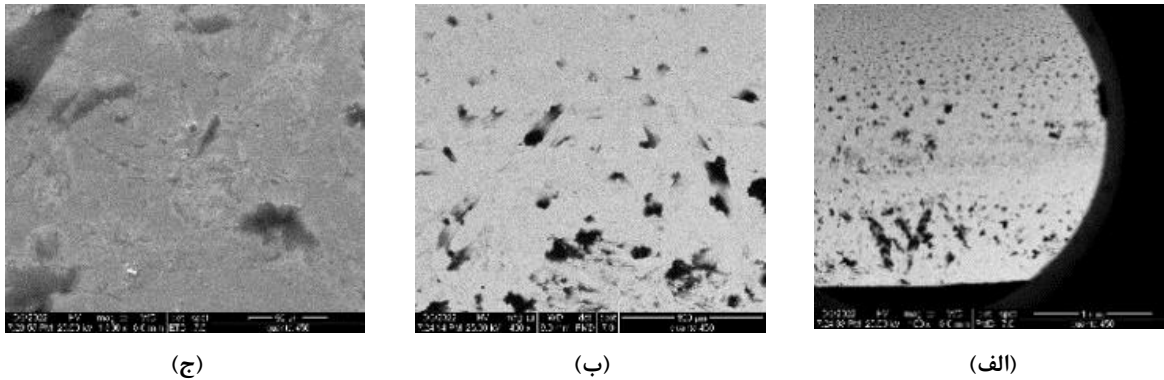
جهت تعیین خواص مکانیکی ناحیه جوشکاری و مقایسه نتایج با مقادیر متناظر فلز پایه، نخست آزمون سختی‌سنجی انجام شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد سختی موضع جوشکاری بعد از فرآیند جوشکاری اصطکاکی با افزودن پودر مس به ۱۴۲HV و بعد از فرآیند جوشکاری با استفاده از ورق نازک مسی به ۱۰۸ HV رسیده است. این در حالی است که سختی فلز پایه ۱۱۰HV می‌باشد. در شکل ۶، نمودار نیرو-جابجایی برای فلز پایه، نمونه جوشکاری با افزودن ورق مسی و نمونه جوشکاری با تزریق پودر مس مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در نمودار ملاحظه می‌شود، که استحکام تسلیم قطعه سالم نسبت به استحکام تسلیم قطعات ترمیم شده با دو روش پودر فلز و ورق مسی پایین‌تر است، بهره‌گیری از روش ورق مسی استحکام نهایی بالاتری در مقایسه با روش پودر مس در پی خواهد داشت.



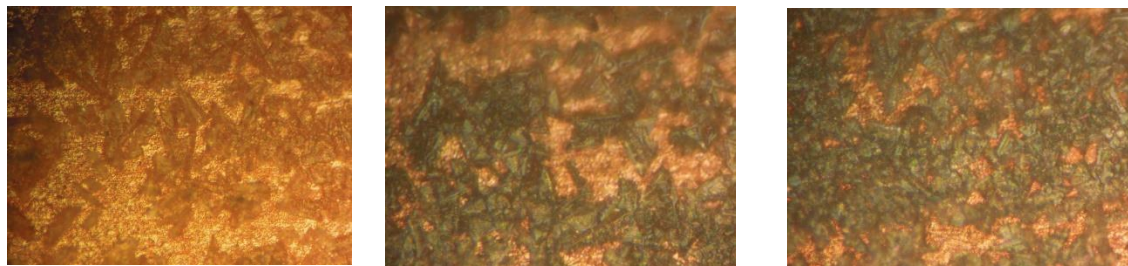
شکل ۶ نمودار مقایسه استحکام کششی جوشکاری‌ها (نیرو-جابجایی) نیرو محور عمودی نیوتن متر-جابجایی میکرون محور افقی

در شکل ۷ تصاویر متالوگرافی فلز پایه، موضع ترمیم شده با پودر مس و موضع ترمیم شده با ورق مسی نازک نشان داده شده است. این تصاویر نشان می‌دهند که دانه‌بندی موضع جوشکاری پس از فرآیند ترمیم با دو روش جوشکاری با پودر مس و جوشکاری با ورق نازک مسی نسبت به دانه‌بندی فلز پایه بزرگ‌تر است.

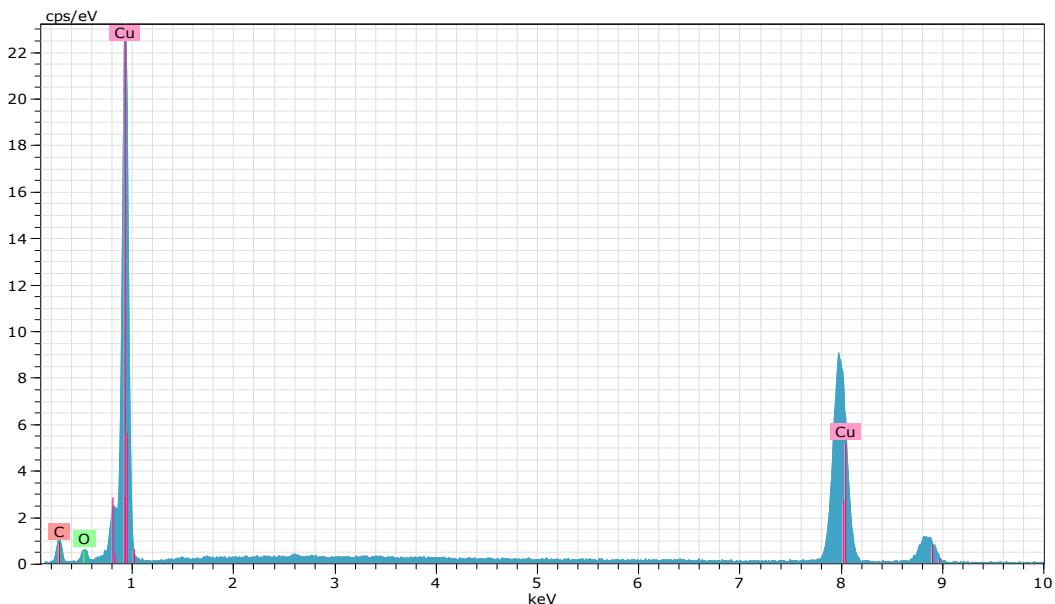
در آزمایش‌های SEM با دستگاه QUANTA 200، اثری از مک و حفره مشاهده نگردید. در جوشکاری با استفاده از پودر مس میزان ناخالصی در جوشکاری بیشتر از جوشکاری با استفاده از ورق مسی بود. همان‌طور که از آنالیز عنصری مشخص است در روش جوشکاری با استفاده از پودر مس در محل جوشکاری اکسید وجود دارد و این امر باید با محافظت محل جوشکاری از تأثیرگذاری اکسیژن هوا بر جوشکاری برطرف گردد.



شکل ۸ تصاویر SEM موضع جوشکاری با استفاده از ورق نازک مس (الف) بزرگنمایی ۱۰۰ و عرض تصویر ۱ میلی‌متر (ب) بزرگنمایی ۴۰۰ و عرض تصویر ۰/۳ میلی‌متر (ج) بزرگنمایی ۱۳۰۰ و عرض تصویر ۰/۰۵ میلی‌متر

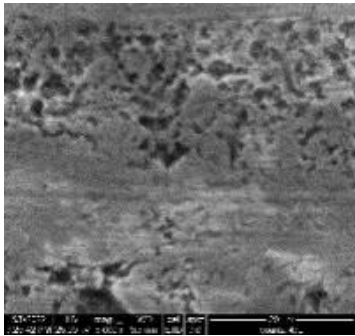


شکل ۷ تصویر میکروسکوپی از (الف) فلز پایه (ب) محل جوشکاری با استفاده از پودر مس (ج) محل جوشکاری با استفاده از ورق نازک مس با بزرگنمایی ۱۰۰

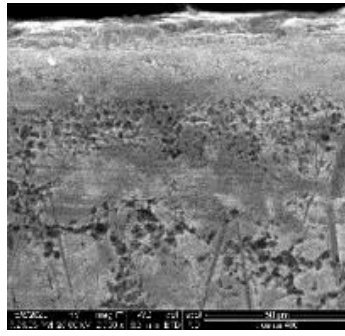


شکل ۹ آنالیز عنصری از محل اتصال جوشکاری اصطکاکی با استفاده از ورق نازک مسی از محل تصویر SEM با بزرگنمایی ۱۳۰۰

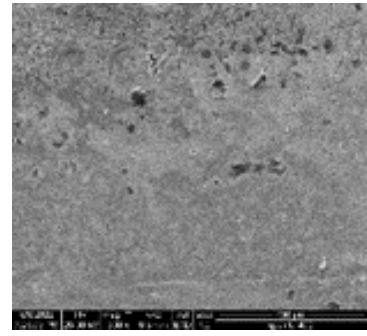
تصاویر SEM و آنالیز عنصری EDX در جوشکاری با استفاده از پودر مسی در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. در شکل ۱۱ آنالیز عنصری از محل جوشکاری اصطکاکی با استفاده از پودر مس از محل تصویر SEM با بزرگنمایی ۶۰۰۰ نشان داده شده است. تصاویر SEM و آنالیز عنصری EDX در جوشکاری با استفاده از پودر مس قابل مشاهده است. نتایج حاصل از تصاویر SEM و آنالیز عنصری EDX عدم وجود حفره و ناخالصی در جوشکاری با استفاده از ورق نازک با ضخامت ۱ میلی‌متر و ساختار همگن جوشکاری را نشان می‌دهد، در حالی که در فرآیند جوشکاری با استفاده از پودر مس، در محل جوشکاری ناخالصی دیده می‌شود.



(ج)

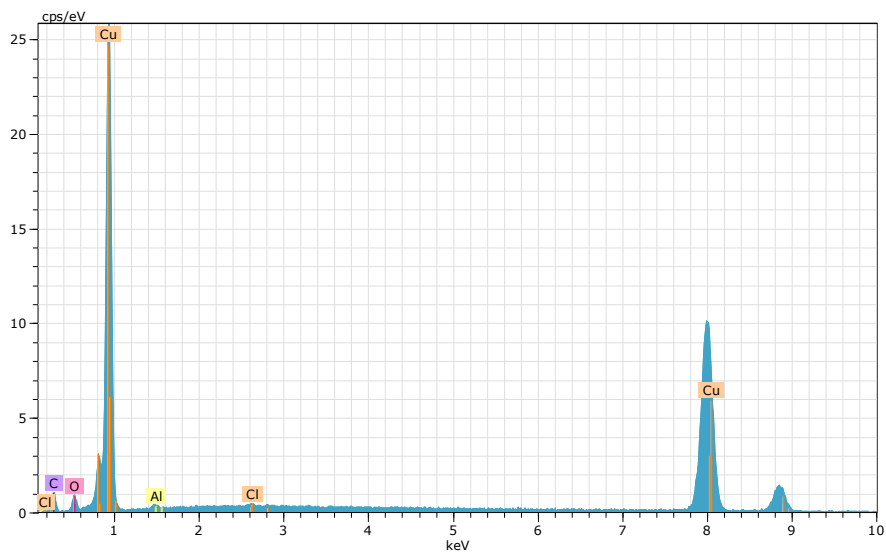


(ب)



(الف)

شکل ۱۰ تصاویر SEM از محل جوش با استفاده از پودر مس. (الف) تصویر با عرض ۰/۴ میلی‌متر و بزرگنمایی ۳۰۰ (ب) تصویر با عرض ۰/۰۵ میلی‌متر و بزرگنمایی ۲۵۰۰، (ج) تصویر با عرض ۰/۰۲ میلی‌متر و بزرگنمایی ۶۰۰۰



شکل ۱۱ آنالیز عنصری از محل جوشکاری اصطکاکی با استفاده از پودر مس از محل تصویر SEM با بزرگنمایی ۶۰۰۰

در شکل ۱۲، میزان زبری سطح، RA، بعد از فرآیند جوشکاری زمانی که از پودر مس استفاده شد (۰/۶۴۳ میکرون) و زمانی که از ورق مسی استفاده شد (۱/۳۴۶ میکرون) نشان داده شده است.

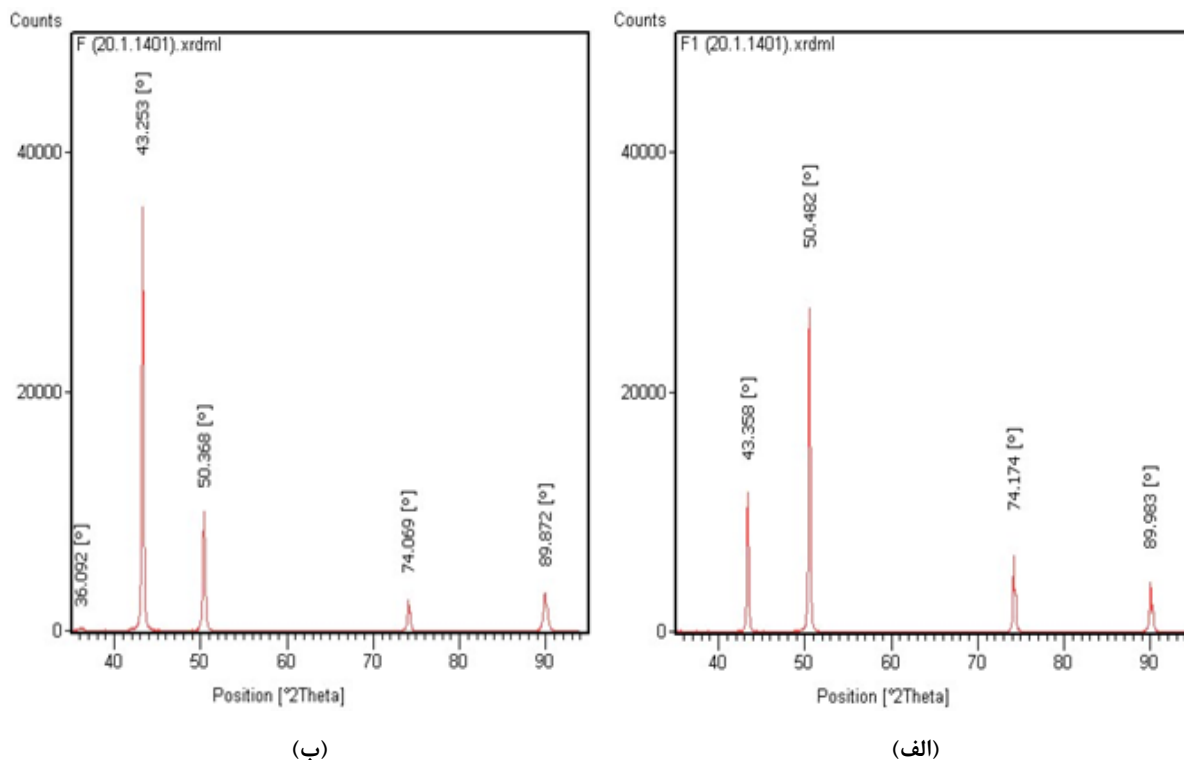


(ب)



(الف)

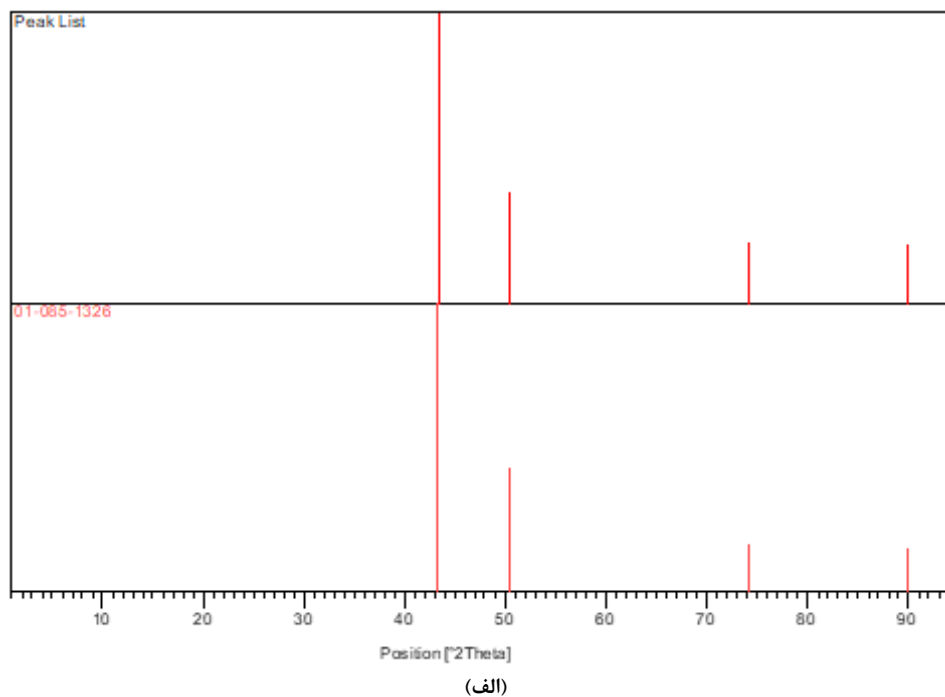
شکل ۱۲ زبری سطح بعد از جوشکاری اصطکاکی افزودن. (الف) با استفاده از ورق مس، (ب) با استفاده از پودر مس.



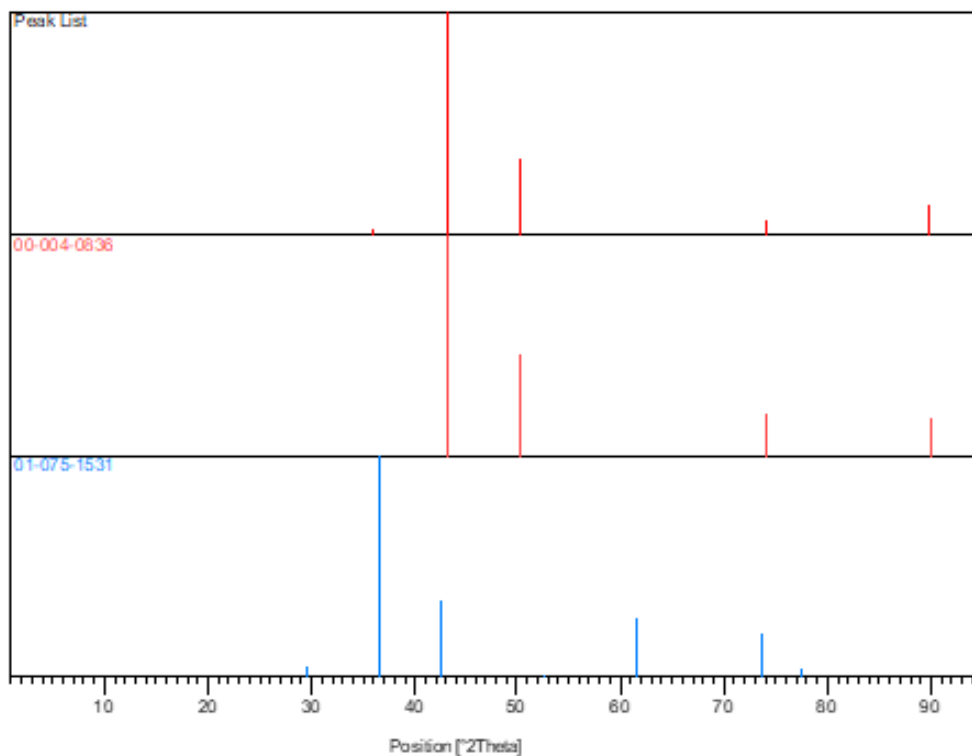
شکل ۱۳ مشاهده پیک‌ها در آزمون آنالیز عنصری با ورق مس. (الف) قبل از جوشکاری، (ب) بعد از جوشکاری.

به‌منظور بررسی تغییرات ساختار کریستالی، از آزمایش XRD استفاده شده است و با مقایسه فهرست مقادیر پیک قبل و بعد از جوشکاری (شکل ۱۳)، در فرآیند جوشکاری با استفاده از ورق مسی ملاحظه شد که تغییرات فاصله صفحات کریستالی در حد آنگستروم است.

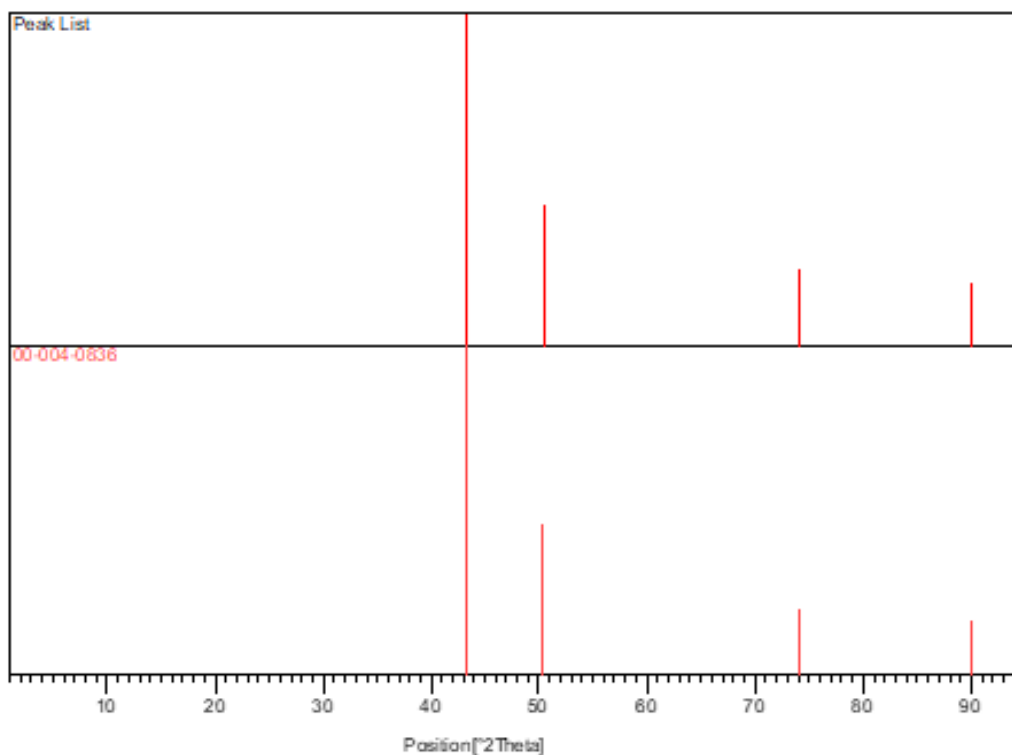
در شکل ۱۴، نمودارهای مقادیر پیک برای فرآیند جوشکاری با استفاده از پودر مس نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۴ نمودار پیک‌ها برای جوشکاری با استفاده از پودر مس. (الف) فاز فلز پایه مسی جهت جوشکاری (شکل ادامه دارد)

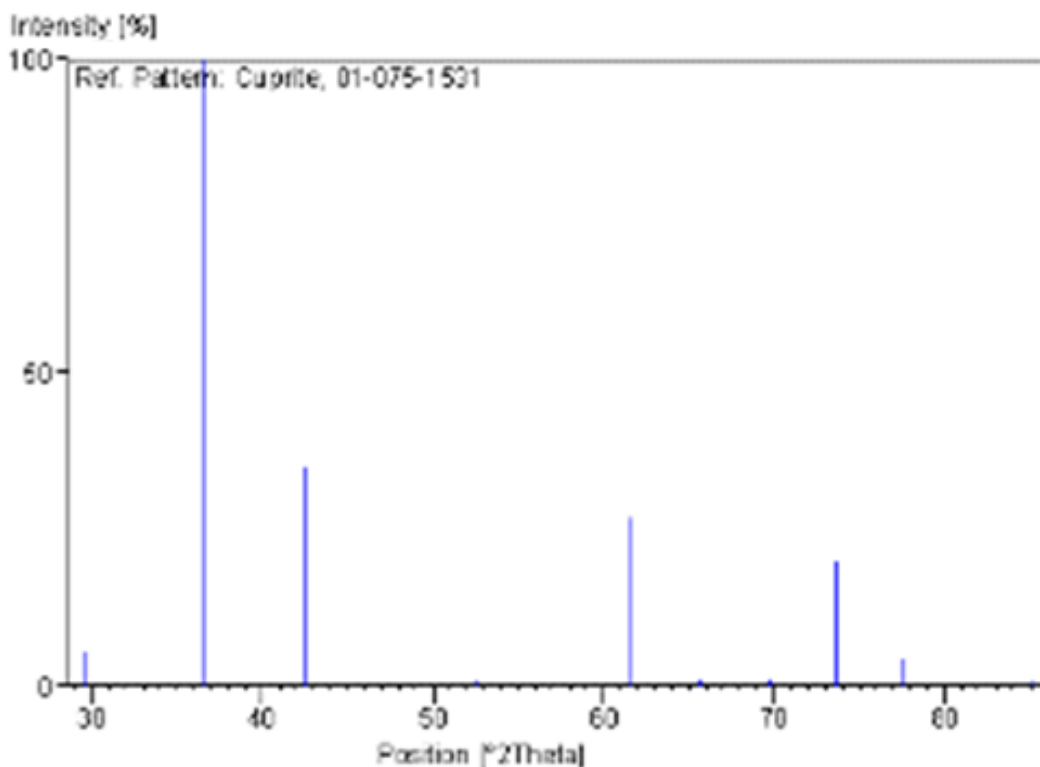


(ب)



(ج)

شکل ۱۴ نمودار پیک‌ها برای جوشکاری با استفاده از پودر مس. (ب) نمودار فازهای محل جوش بعد از جوشکاری، (ج) نمودار فازهای پودر مس قبل از جوشکاری اصطکاکی (شکل ادامه دارد)



(د)

ادامه شکل ۱۴ نمودار پیک‌ها برای جوشکاری با استفاده از پودر مس. (د) نمودار فاز اکسید مس موجود در محل جوش بعد از فرایند جوشکاری اصطکاکی افزودنی.

در فرآیند جوشکاری با استفاده از پودر مس جدول پیک‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت و از مقایسه این جداول که مربوط به فلز پایه و پودر قبل از جوشکاری و محل جوشکاری در زمان بعد از جوشکاری است این نتیجه حاصل شد که فاصله بین صفحات کریستالی در حد آنگسترم افزایش یافته است و این تغییرات کمتر از ۳ درصد است. نکته دیگر که در تصاویر قابل مشاهده است به دلیل ترکیب شدن اکسیژن هوا در جوشکاری با استفاده از پودر مس ساختار جوشکاری ایجاد شده دو فازی می‌باشد و فاز جدید آن همان اکسید مس می‌باشد. لذا جهت دستیابی به جوشکاری تک فازی با استفاده از پودر مس باید در هنگام جوشکاری منطقه جوشکاری محافظت شود تا فاز اکسید مس ایجاد نگردد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به مطالعه تجربی فرآیند جوشکاری اصطکاکی افزودنی برای ترمیم سطحی قطعات مسی پرداخته شد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که فرآیند ترمیم سطحی با استفاده از پودر مس و ورق نازک با ضخامت ۱ میلی‌متر، خواص مکانیکی و متالوگرافی بهتری در مقایسه با جوشکاری با الکتروود مصرفی در پی دارد. آزمایش سختی‌سنجی نشان می‌دهد که سختی محل جوشکاری بعد از فرآیند ترمیم با استفاده از پودر فلز مس (۱۴۲HV) بود که این مقدار از سختی محل جوشکاری با استفاده از ورق نازک با ضخامت ۱ میلی‌متر (۱۰۸HV) بیشتر است. از آزمایش تست کشش این نتیجه حاصل شد که نمونه جوشکاری با ورق نازک مسی با ضخامت ۱ میلی‌متر دارای استحکام اولیه بالاتری نسبت به دیگر نمونه‌ها است. نتایج حاصل از متالوگرافی مقاطع برش خورده از جوشکاری اختلاف زیادی بین دو روش جوشکاری با استفاده از پودر مس و جوشکاری با استفاده از ورق نازک مسی با ضخامت ۱ میلی‌متر را نشان نمی‌دهد و رشد دانه‌بندی‌ها اختلاف زیادی ندارند. نتایج حاصل از تصاویر SEM و آنالیز عنصری EDX نشان‌دهنده عدم وجود حفره و ناخالصی در جوشکاری با استفاده از ورق نازک با ضخامت ۱ میلی‌متر را نشان می‌دهد و ساختار همگن است ولی در جوشکاری با استفاده از پودر مس وجود ناخالصی در محل جوشکاری را نشان می‌دهد. از آزمایش‌های حاصل از XRD این نتیجه به دست آمد که در جوشکاری با استفاده از ورق نازک مس به دلیل کاهش فاصله بین

صفحات در حد آنگستریم تغییراتی در ساختار کریستالی ایجاد شده است که این تغییرات در ساختار کریستالی می تواند با استفاده از کاربرد قطعات، نقش زیادی در انتخاب روش ترمیم دارد. در جوشکاری با استفاده از پودر مس این نتیجه به دست آمد که محل جوشکاری دارای ساختار دو فازی است و این دوفازی بودن به دلیل وجود اکسید مس می باشد. آزمایش زبری سطح بعد از انجام فرآیند جوشکاری نشان می دهد که در جوشکاری با استفاده از پودر مس جهت پر نمودن محل عیوب دارای کیفیت بالاتری نسبت به جوشکاری با استفاده از ورق نازک مس می باشد.

Authorship Contribution Statement

Dr. Ali Jabbari



Biography: Ali Jabbari was born in Shazand, Iran, in 1980. He received the B.Sc degree from the "Iran University of Science and Technology" in 2002 and his MSc and PhD degrees both in Manufacturing and Production Engineering from "Mazandran University" in 2004 and 2009, respectively, with a focus on the design and the optimization of brushless DC permanent magnet machines for direct drive applications. He is currently an Associate Professor with the Department of Manufacturing and Production Engineering, Arak University, Arak, Iran. Since 2014, he has been the Head of "Gearless Wind Turbine Project" team.

Interests: Gearless Wind Turbine Design, Analytical Modeling, PM Machines, Subdomain Technique, Friction Stir Welding, Metal Forming.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Validation, Data Curation, Project administration, Supervision, Writing, Reviewing and Editing, Resources.

Ali Baniasadi



Biography: Ali Baniasadi was born in Iran. He received the MSc degrees in Manufacturing and Production Engineering from "Arak University" in 2022, with a focus on the additive friction stir enabled solid-state manufacturing for repair of copper.

He presented his thesis in the field of analysis and simulation of Line Start Permanent Magnet Machine in 2022

Interests: Friction stir welding, Additive manufacturing.

Contribution Statement: Investigation, Visualization, Formal analysis, Validation, Original draft preparation.

Dr Ehsan Soury



Biography: Ehsan Soury was born in Toyserkan, Iran, in 1983. He received the B.Sc degree from the "Iran University of Science and Technology" in 2005 and his MSc and PhD degrees both in Mechanical Engineering from "Tarbiat Modares University" in 2007 and 2012, respectively, with a focus on the design and the manufacture of wood-plastic composite parts by extrusion process.

He was an Assistant Professor with the Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran. Since 2012 to 2022, and currently works as head of research and development for universal Moulding Ltd in British Columbia, Canada.

Interests: plastic and composite technology, metal and machining and fabrication, renewable energy, manufacturing processes.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Validation, Data Curation, Project administration, Supervision, Writing, Reviewing and Editing, Resources.

۵. مراجع

- [1] Griffiths, R. Joey, Dylan T. Petersen, David Garcia, and Hang Z. Yu. "Additive friction stir-enabled solid-state additive manufacturing for the repair of 7075 aluminum alloy. Applied Sciences. 2019;17:3486.
- [2] Seidi, Ebrahim, and Scott F. Miller. "A novel approach to friction surfacing: experimental analysis of deposition

- from radial surface of a consumable tool. *Coatings*. 2020;11:1016.
- [3] Meengam, C., S. Chainarong, and P. Muangjunburee. Friction welding of semi-solid metal 7075 aluminum alloy. *Materials Today: Proceedings*. 2017;4:1303-1311.
- [4] Khodabakhshi, F., and A. P. Gerlich. Potentials and strategies of solid-state additive friction-stir manufacturing technology: A critical review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018;36:77-92.
- [5] Çam, Gürel, and Selcuk Mistikoglu. Recent developments in friction stir welding of Al-alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2014;23:1936-1953.
- [6] Hang, Z. Yu, Mackenzie E. Jones, George W. Brady, R. Joey Griffiths, David Garcia, Hunter A. Rauch, Chase D. Cox, and Nanci Hardwick. Non-beam-based metal additive manufacturing enabled by additive friction stir deposition. *Scripta Materialia*. 2018;153:122-130.
- [7] Threadgill, P. L., A. J. Leonard, H. R. Shercliff, and P. J. Withers. "Friction stir welding of aluminium alloys. *International Materials Reviews*. 2009;54:49-93.
- [8] Han, Bing, Yongxian Huang, Shixiong Lv, Long Wan, Jicai Feng, and Guansheng Fu. AA7075 bit for repairing AA2219 keyhole by filling friction stir welding. *Materials & Design*. 2013;51:25-33.
- [9] Ji, Shude, Xiangchen Meng, Lin Ma, Hao Lu, and Shuangsheng Gao. Vertical compensation friction stir welding assisted by external stationary shoulder. *Materials & Design*. 2015;68:72-79.
- [10] Liu, H. J., and H. J. Zhang. Study of hybrid welding repair process of friction stir welding groove defect. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2012;17:169-173.
- [11] Kamalvand, Ezatolah, Ali Jabbari, Mohammad Reza Sheykholeslami, Siamak Mazdak, Reza Beygi, and Sajad Mohammadi. Effect of friction stir welding parameters on the deep drawing of tailor-welded blanks (TWBs). *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021;33:91-99.