نشریه علمی

تحقیقات در علوم مهندسی سطح و نانو مواد

سال ۱، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱ ٤٦

بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی خواص مکانیکی و فیزیکی ناحیه جوش مواد کامپوزیتی با زمینه ی آلومینیمی

بیژن محمدی لندی[۱]، حسن کاوسی بلوتکی*[۱]، ایمان گل‌شکوه [۱]، محمد گودرزی خویگانی[۱]

[۱] گروه مهندسی مکانیک، واحد ایذه، دانشگاه آزاد اسلامی، ایذه، ایران

چکیده

در حال حاضر از آلومینیوم به علت چگالی پایین و مقاومت به خوردگی مناسب در صنایع مختلف به وفور استفاده می‌شود. در این تحقیق به شبیه سازی اثر فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی مقاومت مکانیکی ورق آلومینیومی، با زمینه چند لا یه آلومینیوم و کامپوزیت الیافی کربن یا شیشه با زمینه آلومینیومی پرداخته می‌شود. ابتدا ورق آلومینیوم در ابعاد مشخص با نرم افزار المان محدود انسیس شبیه سازی سد. سپس بر روی آلیاژ آلومینیوم عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از یکی از پارامترهای تحقیق از جمله سرعت یا عمق نفوذ ابزار انجام و بررسی شد. طبق نتایج پژوهش با شروع حرکت پین، مقدار تنش اعمالی به صفحه کاهش می‌یابد. بنابراین کاهش سرعت حرکت خطی پین و افزایش سرعت دورانی آن باعث می‌شود تا فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روند بهتری را طی کند و با شروع حرکت پین، مقدار جابه-جایی ذرات صفحه کاهش می‌یابد. با بررسی ذرات دیده شد که حرکت پین در طول صفحه یک منطقه اغتشاشی را در صفحه ایجاد می‌کند. مشاهده شده است که با اعمال تنش توسط پین، ذراتی که در منطقه HAZ هستند نیز جابه‌جایی داشته و متناسب با مسیر حرکت از سطح بالا یی منطقه جوشکاری وارد شده و از سطح پایین آن خارج می‌شوند. مشاهده شد که کامپوزیت آلومینیم به صورت مطلوبی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شرکت می‌کند و قطعه در این فرآیند آسیب نمی‌بیند.

واژه‌های کلیدی: *جو شکاری ا صطکاکی اغت شا شی، خواص مکانیکی، خواص فیزیکی ، آلیاژ آلومینیوم.*

تاریخ دریافت: ۱٤۰۱/۰۷/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱٤۰۱/۰۹/۲٦

Investigating the effect of friction stir welding parameters on the mechanical and metallurgical properties of the weld zone Aluminum-based composite materials

Bijan Mohammadi Landi [1], Hasan Kavoosi Balutaki [*1] Iman Golshokouh[1], Mohammad Goudarzi Khoigani [1]

[1] *Department of Mechanical engineering, Izeh Branch, Islamic Azad University, Izeh, Iran*

Abstract

Currently, aluminum is widely used in various industries due to its low density and good corrosion resistance. In this research, the simulation of the effect of friction stir welding process on the mechanical strength of aluminum sheet with aluminum multilayer background and carbon fiber or glass composite with aluminum background is discussed. First, the aluminum sheet in specific dimensions with Ensys finite element software for dam simulation. Then, friction stir welding was performed on aluminum alloy using one of the research parameters such as speed or penetration depth of the tool. According to the results of the research, when the pin starts moving, the amount of stress applied to the plate decreases. Therefore, reducing the speed of the linear movement of the pin and increasing its rotational speed makes the friction stir welding process go through a better process, and when the pin moves, the displacement of the plate particles decreases. By examining the particles, it was seen that the movement of the pin along the plate creates a turbulent area in the plate. It has been observed that with the application of stress by the pin, the particles in the HAZ area are also displaced and enter from the upper surface of the welding area and exit from the lower surface according to the direction of movement. It was observed that the aluminum composite participates favorably in the friction stir welding process and the part is not damaged in this process.

Keywords: *Friction Stir Welding, Mechanical Properties Metallurgical Properties, Aluminum Alloy.*

Received: 15/10/2022
Accepted: 17/12/2022

* نویسنده مسئول: حسن کاوسی بلوتکی

نشانی: ایذه ، گروه مهندسی مکانیک، واحد ایذه، دانشگاه آزاد اسلامی

پست الکترونیکی: Hakavoosi@yahoo.com

۱. مقدمه

جوشکاری یک روش اتصال‌دهی مواد مهندسی است که به طور گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. در کنار مزایایی که برای این روشی وجود دارد، ممکن است عیوبی نیز در حین کار در قطعه ایجاد شود. همواره هدف تمام مهندسان و محققان به دست آوردن اتصالی بدون عیب بوده است که این مسئله شکل ایده آل رسیدن به هدف اتصال‌دهی است [۲]. تاکنون تلاش‌های فراوانی در زمینه تعیین شرایط بهینه جوشکاری به روش‌های مختلف ذوبی و غیر ذوبی، همچنین به حداقل رساندن عیوب حاصل از جوشکاری انجام گرفته است [۳]. روش‌های جوشکاری را می‌توان به دو دسته جوشکاری حالت ذوبی و جوشکاری حالت جامد تقسیم نمود. در جوشکاری ذوبی، محل اتصال دو قطعه به یکدیگر توسط حرارت ذوب شده و سپس با استفاده از یک ماده پرکن کمکی و یا بدون آن عمل جوشکاری انجام می‌گیرد. یکی از معایب این روش تغییر شکل دانه‌ها در فلز پایه در نتیجه دماهای بالا می‌باشد که منجر به ترد و شکننده شدن فلز می‌گردد. آلیاژهای آلومینیم هنگامی که با روش‌های معمول ذوبی جوشکاری می‌شوند، عیوبی همچون تخلخل، ترک گرم، کاهش استحکام و انعطاف پذیری در منطقه متاثر از حرارت را از خود نشان می‌دهند [٤]. به همین دلیل روش پرچ کاری به طور گسترده جهت اتصال اجزاء ساختاری در هواپیما استفاده می‌شود. این نوع اتصال نیز دارای استحکام و مقاومت به خوردگی ضعیفی می‌باشد. اتصال بین مواد مختل در صنعت از اهمیت بالایی برخوردار است. جوشکاری به دلیل این که دارای مزیت‌های فراوانی نسبت به سایر روش‌های اتصال از قبیل اتصالات مکانیکی و یا اتصال چسبی است رد صنعت همیشه مورد توجه بوده است [۵]. از اصلی ترین ملزومات یک اتصال، داشتن خواص مکانیکی مطلوب در مقایسه با مواد پایه است بنابراین در مورد روش‌های جدید جوشکاری تحقیقات زیادی صورت گرفته است که جوشکاری به روش اصطکاکی اغتشاشی[1](FSW) یکی از این‌ها است [٦].

برخلاف روش‌های ذوبی در این روش دما تا نقطه ی ذوب افزایش نمی‌یابد بلکه حدود ۸۰ تا ۹۰٪ دمای ذوب افزایش می‌یابد و به همین دلیل هیچ ذوبی صورت نمی‌گیرد [۷] بلکه فقط حالت نرم شدن اتفاق می‌افتد و از طرفی چون ذوب اتفاق نمی‌افتد [۸] میزان فازهای بین فلزی[2](IMCs) ایجاد شده در مقایسه با حالت جوشکاری ذوبی بسیار کمتر خواهد بود [۹] که همین باعث می‌شود که جوشکاری به این روش دارای خواص بسیار مطلوب تری از روش‌های ذوبی باشد [۱۰]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با حرکت مواد به صورت پیچیده و تغییر شکل پلاستیک آن همراه است. هندسه ابزار و طراحی اتصال که پارامترهای جوشکاری می‌باشند [۱۱]، تأثیرات مهمی را روی الگوی جریان مواد، توزیع حرارت و در نهایت بر روی تکامل ساختاری مواد می‌گذارد [۱۲]. در حالت کلی متغییرهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی عبارتند از: سرعت دورانی ابزار [۱۳]، سرعت پیشروی ابزار [١٤]، فشار عمودی از جانب ابزار به قطعه کار [۱۵]، ضخامت قطعه کار[١٦]، ابزار (ابعاد، شکل هندسی، جنس ابزار و جنس پوشش سطح ابزار) زاویه ابزار با خط عمود بر سطح قطعه (زاویه انحراف)، نحوه مهار قطعه و نیروی مهار کننده. در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی حرکت دورانی ابزار و اصطکاک آن با قطعه کار سبب تولید حرارت، افت استحکام و افزایش شکل‌پذیری مواد اطراف پین شده [۱۷] و حرکت انتقالی سبب جابه‌جایی مواد از جلوی ابزار به پشت آن و اتصال‌دهی می‌شود؛ بنابراین حرارت در این فرایند نقش مهمی ایفا می‌کند و پارامترهایی نظیر سرعت دورانی، سرعت پیشروی ابزار، هندسه ابزار و متغییرهای دیگری از این دست، همگی به نحوی در کنترل میزان حرارت ورودی و به تبع آن نحوه اغتشاش و الگوی جریان ماده، تکامل ریزساختار و در نهایت کیفیت جوش حاصل، اثر بسزایی دارند. درک کامل از جریان مواد و تکامل ریزساختاری در طول جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک عنصر اصلی در درک نقایص جوش، ریزساختارهای بعد از جوش و خواص آن است [۱۷]. اگرچه تحقیقات بسیاری

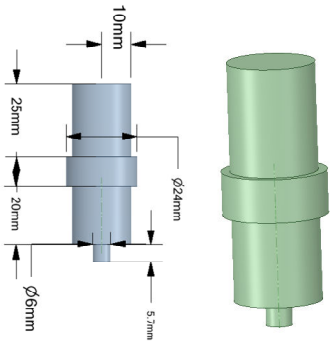
[1] Friction stir welding

[2] Inter metallic compounds

برای روشن شدن رفتار جریان مواد در طول جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام شده است، نظریه‌های موجود اغلب متناقض هستند [١٧]. برخی تحقیقات برای درک جریان مواد در طول جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیم انجام شده است [١٧-١٤]. انگیزه انجام این تحقیق، وجود نیاز به درک بهتر از فرآیند و محدودیت‌های کنونی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی متداول و تلاش در جهت برطرف نمودن نقاط ضعف آن جهت کاربردهای خاص بوده است. عدم توانای در میزان کنترل حرارت منطقه جوش توانسته باعث بروز برخی از محدودیت‌های استفاده از این روش گردد. هدف کلی از انجام این تحقیق بررسی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به منظور گسترش دانش موجود از فرآیند و بسط دامنه کاربردهای آن می‌باشد.

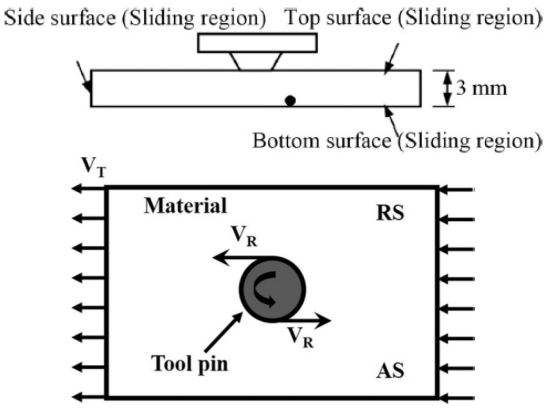
٢ . روش تحقیق

پژوهش حاضر توصیفی تحلیلی بوده و از نظر هدف کاربردی می‌باشد. ابتدا ورق آلومینیوم در ابعاد مشخص با نرم افزار المان محدود انسیس شبیه سازی می شود. سپس بر روی آلیاژ آلومینیوم عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از یکی از پارامترهای ذکر شده در فرضیه های تحقیق از جمله سرعت یا عمق نفوذ ابزار انجام و بررسی می شود. در قدم دوم شبیه سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را بر روی کامپوزیت زمینه آلومینیومی و چند لایه کامپوزیت الیافی و آلومینیوم با الیاف کربن یا شیشه انجام می‌دهیم. این بار نیز با تغییر پارامترهای مذکور به بررسی تنش ها پرداخته می شود و مقادیر بهینه پارامترها را به دست می آوریم. از جمله پارامترهایی که از متغیرهای مطالعه به حساب می‌آید تغییر نسبت ضخامت الیاف و آلومینیوم می باشد. مشخصات هندسی پین در شکل زیر آورده شده است:



شکل ١- هندسه ابزار جوشکاری

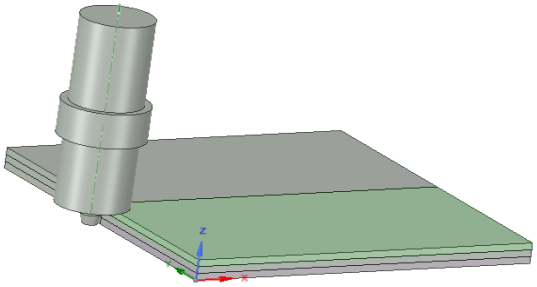
این پین بر روی قطعه ای با جنس آلومینیم ٦٠٦١ و ٢٠٢٤ با در نظرگیری لایه میانی کربن و ابعاد هر لایه ١٠٠mm × ٤٩/٨mm × ٢mm حرکت می‌کند. شرایط مرزی که در قسمت قبلی توضیح داده شد در شکل ٢ نمایش داده شده است.



شکل ٢- هندسه و شرایط مرزی مدل [١٠,١٤]

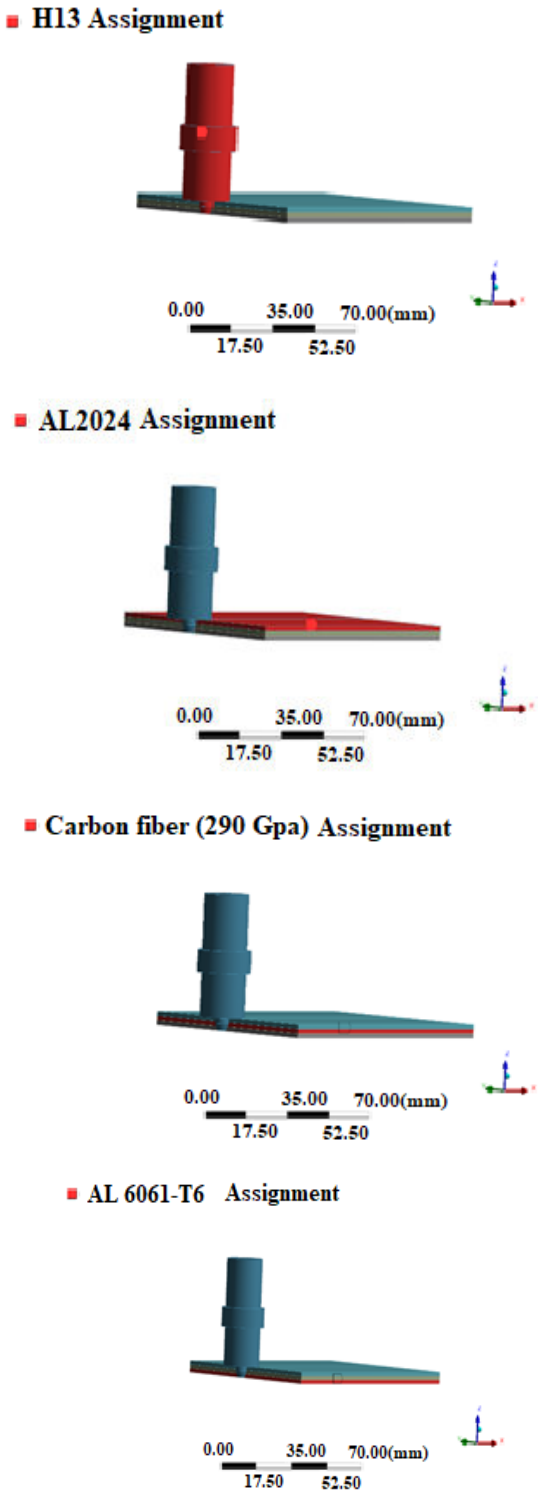
٣ . بحث و نتایج

در پژوهش حاضر برای حل مطلوب یک مسئله نیاز است که هندسه‌ای مناسب ترسیم شود. در این پژوهش در نرم‌افزار SpaceClaim هندسه مسئله به صورت سه بعدی رسم شده است. ابعاد و اندازه‌های این هندسه مطابق با داده‌های موجود در فصل سوم است.



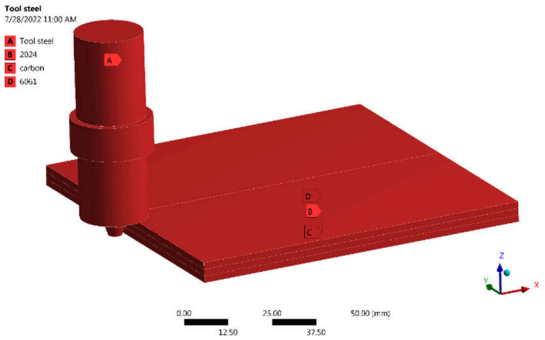
شکل ۳- محل قرارگیری سنبه و صفحات کامپوزیت آلومینیومی

در این مرحله لازم است متریال هر صفحه کامپوزیتی و متریال مناسب سنبه تعریف گردد. شکل ٤ ، تعریف متریال مشخص شده است.



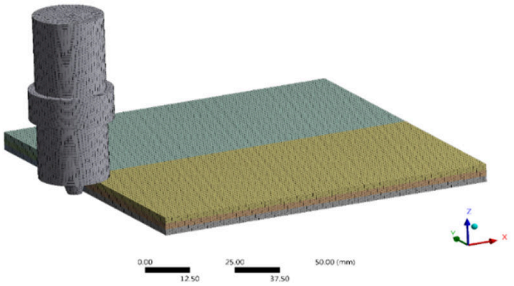
شکل ٤- تعریف متریال مسئله

بعد از باز کردن فایل هندسی در محیط مش، برای هر خط شکل نام گذاری تعیین می‌شود. این امر کمک می‌کند تا در نرم‌افزار انسی شرایط مرزی تعیین شود. کل سطوح نام گذاری شده در زیر قسمت Named Selections در قسمت Outline آورده شده است. بعد از نام‌گذاری نیز مشخصات مش تعیین می‌شود. نام گذاری قسمت‌های مختلف و مکان هر کدام از آن‌ها در شکل ٥ آمده است.



شکل٥- نام‌گذاری قسمت‌های مختلف مدل

طبق شکل ٦ مش ایجاد می‌شود. هم‌چنین تعداد المان‌های مش در مدل بررسی شده، ۱٦۰،۰۰۰ عدد می‌باشد. مش‌ها به صورت مربعی و با روش MultiZone در مدل‌ها اجرا شده‌اند.



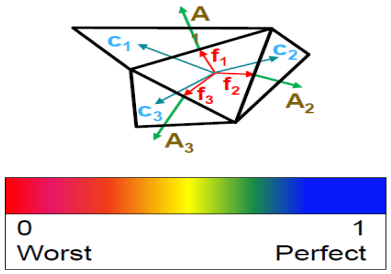
شکل ٦- نمایش شبکه بندی مدل

بعد از تعیین مشخصات کلی مش مطابق با خواسته مسئله معیاری برای تعیین کیفیت مش مشخص می‌شود. گزینهOrthogonal Quality برای نمایش کیفیت مش در قسمت Display Style فعال شده و هم‌چنین در مشخصات مش در قسمت Mesh Metric با این مشخصه مش نمایش داده شده است. کدهای نرم افزارهای تجاری تمایل دارند که کیفیت مش را از نظر معیارهایی تعیین کنند که می‌تواند کیفیت عنصر و درجه بندی عنصر مش را اندازه‌گیری کند به گونه‌ای که حداقل در کمترین حالت، به کاربر امکان

می‌دهد مش‌هایی با کیفیت نامناسب را شناسایی کرده تا آن قسمت‌ها اصلاح شود. چنین کمیتی در قالب معیارهای کیفیت مش ارائه شده است. مفهوم متعامدسازی[1] مش به چگونگی نزدیکی زاویه بین عناصر مجاور (یا لبه‌های عنصر مجاور) می‌باشد، به این دلیل که زاویه بهینه (با توجه به هندسه مربوطه) حاصل شود. نمونه‌ای از مفهوم متعامدسازی در نرم‌افزار انسیس مطابق با شکل زیر ارائه شده است. مقدار متعامدسازی از عدد صفر تا یک متغیر است. عدد یک بیانگر بهترین کیفیت مش و عدد صفر بیانگر بدترین کیفیت مش است. این عدد باید ما بین ۰/٦ تا یک باشد تا مش قابل قبولی حاصل گردد. شکل ۷ نحوه محاسبه متعامدسازی را نشان می‌دهد. بررسی این کیفیت در مدل انجام شده است و مقدار آن برابر با ۰/۹۸ می‌باشد.

$$\min \left(\frac{A_i \cdot f_i}{|\vec{A_i}||\vec{f_i}|} \ , \ \frac{A_i \cdot c_i}{|\vec{A_i}||\vec{c_i}|} \right)$$

on



شکل ۷– نحوه محاسبه متعامدسازی مش

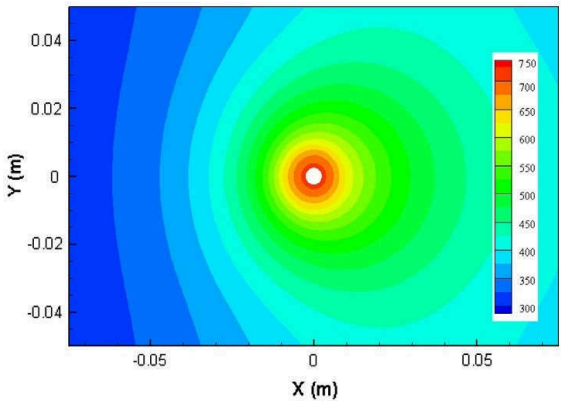
در جهت بررسی مطالعه عددی و مدل سازی ریاضی تاثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی خواص مکانیکی و متالوژیکی ناحیه جوش لازم دانستیم شرایط زیر را در مسئله اجرا نماییم (جدول ۱).

جدول ۱– تعیین پارامترها

پارامترها	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳
سرعت دورانی سنبه	۳۵۵ rpm	٤٥٠ rpm	٥٦٠ rpm
سرعت جوشکاری	mm/min ۸۰	mm/min ۳٥	mm/min ٥٦

پروفیل دمایی قطعه در حالت ۱ در شکل ۸ نمایش داده شده است. با توجه به شکل تغییر شکل پلاستیک زیاد و چرخش پین و اصطکاک بین ابزار و قطعه، باعث افزایش دما در خط جوش و اطراف آن می شود و این عوامل تأثیر زیادی روی ریز ساختار نهایی (اندازه دانه، مرز دانه، خواص مکانیکی و ...) دارند. پس پیش‌بینی توزیع دمایی در قطعه در جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی مهم است.

بیشینه دما در سمت پیش رونده بیشتر از سمت پس رونده می‌باشد. این تفاوت ناشی از ضریب انتقال حرارت مختلف و اختلاف کرنش و نحوه سیلان مواد در این دو سمت است. پروفیل دمایی جوش به وسیله سرعت تولید حرارت توسط منبع حرارتی بر روی قطعه کار و سرعت از دست دادن حرارت جوش کنترل می‌شود. مشاهده می‌شود که در قسمت جلوی ابزار به واسطه انتقال حرارت با قطعه کار سردتر، پروفیل دمایی متمرکزتر بوده و در قسمت پشت ابزار به واسطه اثر منطقه جوشکاری شده ی گرم، شیب دمایی کمتر و پروفیل دمایی کشیده تر می‌باشد.

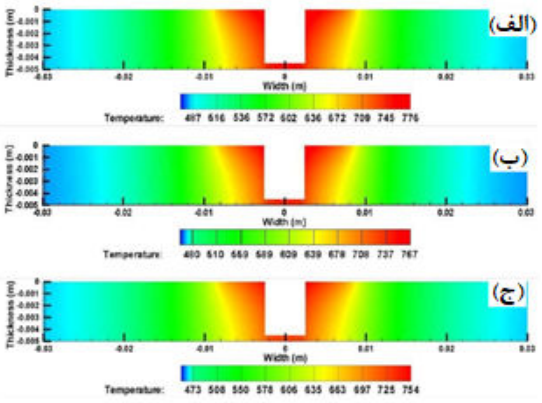


شکل ۸– پروفیل دمایی قطعه در ۸۰ mm/min و ۳۵۵ rpm

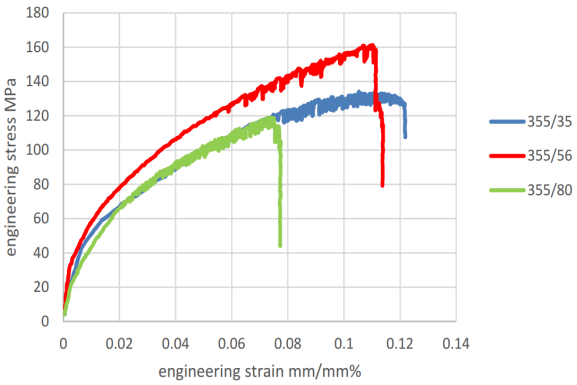
همچنین با افزایش سرعت خطی ابزار ضمن کاهش دمای بیشینه، شیب دمایی مابین محل در حال جوشکاری و دنباله جوش افزایش پیدا می‌کند. تغییر شکل پلاستیک زیاد و چرخش پین و اصطکاک بین ابزار و قطعه، باعث افزایش دما در خط جوش و اطراف آن میشود و این عوامل تأثیر زیادی روی ریزساختار نهایی (اندازه دانه، مرز دانه، خواص مکانیکی و ...) دارند. پس پیش بینی توزیع دمایی در قطعه در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مهم است.

[1] Orthogonal

یکی از اصلی‌ترین متغیرهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی سرعت چرخشی و سرعت خطی می باشد. با افزایش سرعت چرخشی اصطکاک بین ابزار و قطعه بیشتر شده و دما بالاتر می رود، همین‌طور با زیاد شدن سرعت چرخشی ابزار، امکان مخلوط شدن مواد پلاستیک شده در ناحیه جوش افزایش خواهد یافت و به طور کلی حرارت ورودی به قطعه افزایش پیدا می کند. از طرف دیگر افزایش سرعت خطی باعث کاهش حرارت ورودی می شود و ممکن است ابزار نتواند به خوبی مواد را با یکدیگر مخلوط کند و عیب تونل در ساختار پدید بیاید. پس میزان گرمای تولید شده بر اثر چرخش ابزار یک حالت بهینه دارد یعنی اگر گرمای تولید شده در اثر دوران ابزار به‌اندازه کافی نباشد امکان تولید اتصال جوشی مناسب به علت کم بودن دمای مواد جریان پیدا کرده کم خواهد شد بنابراین جوش ایجاد شده از نظر خواص استحکامی افت می‌کند.



شکل ۹- کانتور حرارتی قطعه در سرعت چرخشی ثابت ۳۵۵ rpm و سرعت خطی‌های ۳۵، ۵۶ و ۸۰ mm/min



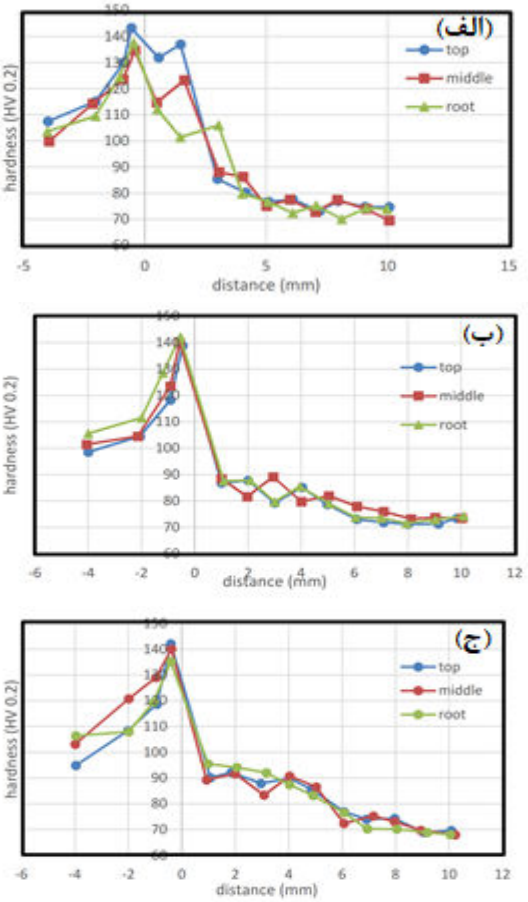
شکل ۱۰- نمودار تنش کرنش مهندسی نمونه‌هایی با سرعت چرخشی ثابت ۳۵۵ rpm و سرعت خطی‌های ۳۵، ۵۶ و ۸۰ mm/min

در شکل ۱۰ سرعت چرخشی ثابت و برابر ۳۵۵ rpm قرار داده شده است. میبینیم که دمای بیشینه با افزایش سرعت خطی کاهش پیدا میکند. یعنی با افزایش سرعت خطی از ۸۰ mm/min تا ۳۵ بیشینه دما از ۷۷۶ به ۷۵۴ کلوین کاهش پیدا کرده است. دلیل این اتفاق این است که با افزایش سرعت خطی، حرارت ورودی کاهش پیدا می‌کند و دمای بیشینه هم پایین می‌آید.

نمودار فوق نشان می‌دهد که در نمونه ۳۵۵/۵۶ استحکام کششی بالاترین مقدار خود، و برابر با ۱۶۳ مگاپاسکال می‌رسد. با توجه به استحکام حالت آنیل آلیاژ پایه آلومینیمی، این اتصال نزدیک به ۶۰٪ بازدهی دارد. با کاهش حرارت ورودی، استحکام اتصال کاهش یافته و در نمونه (۳۵۵/۸۰) به ۱۱۹ مگاپاسکال کاهش پیدا می‌کند. با افزایش حرارت ورودی نیز استحکام اتصال افت می کند و به ۱۳۱ مگاپاسکال می رسد.

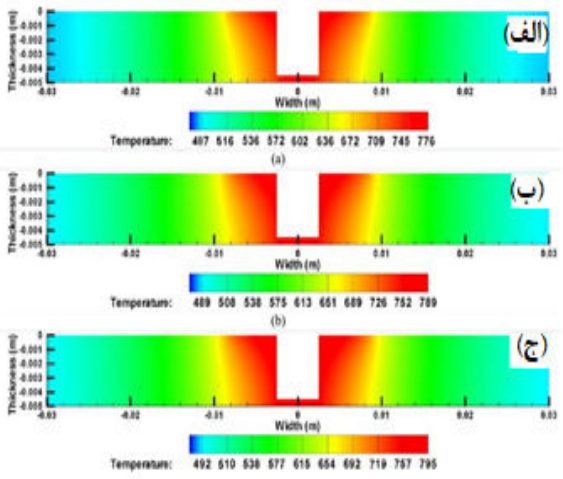
در شکل ۱۱ نمودار تغییرات ریز سختی در مقطع جوش نمونه‌های ۸۰،۵۶،۳۵ mm/min با سرعت چرخشی rpm ۳۵۵ ارائه شده است. اندازه گیری سختی در سه مقطع عرضی مختلف جوش و بر روی یک خط مستقیم انجام شده است. مقدار تغییرات سختی در آلیاژ پایه نمونه ۳۵ mm/min تا نزدیکی منطقه جوش (فاصله ٤ میلی‌متری از فصل مشترک آلومینیم فولاد) در محدوده ۷۶-۶۸ ویکرز متغیر است. در فاصله ٤ میلیمتری از فصل مشترک آلومینیم فولاد مقدار سختی افزایش نسبی داشته به مقادیر ۹۰-۸۰ ویکرز می‌رسد. در قسمت فوقانی نمونه ۳۵ mm/min حداکثر مقدار سختی اندازه گیری شده به ترتیب برابر ۱٤۳ ویکرز می‌باشد.

نحوه تغییرات سختی در منطقه جوش هر دو نمونه در قسمت فوقانی، میانه و ریشه جوش تقریبا مشابه بوده و از مقدار ۷۸ ویکرز در منطقه متأثر از عملیات ترمومکانیکی به حدود ۹۶ ویکرز در منطقه جوش میرسد. بنابراین مقدار سختی در منطقه جوش سمت آلومینیم بالاتر از سختی قسمت کامپوزیتی است.



شکل ۱۱- تغییرات ریز سختی در مقطع دکمه جوش نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۳۵۵ rpm و سرعت خطی الف) ۳۵، ب) ۵۶، ج) ۸۰ mm/min

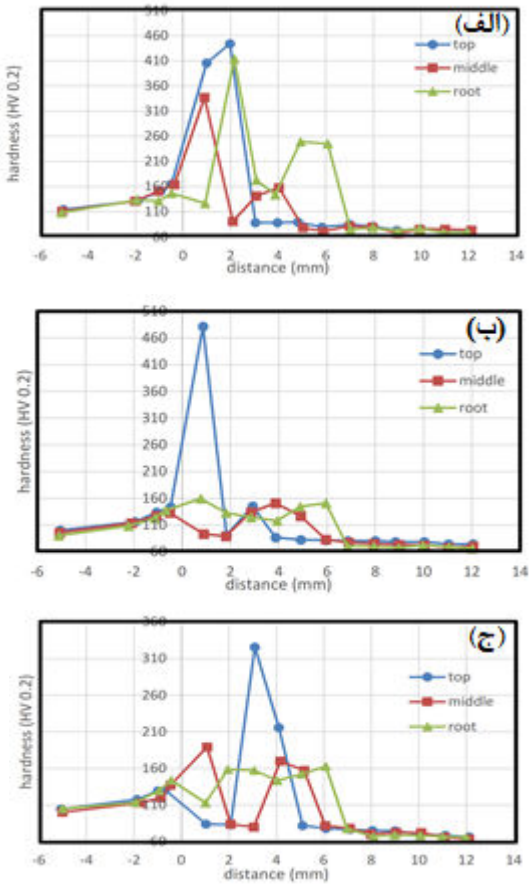
در شکل ۱۲ سرعت خطی ثابت و برابر ۳۵ mm/min در نظر گرفته شده است. در سرعت چرخشی ۳۵۵، دمای بیشینه برابر ۵۰۳ کلوین است و با افزایش سرعت چرخشی به ۴۵۰ و ۵۶۰، دمای بیشینه به ترتیب به ۵۱۶ و ۵۲۲ کلوین می‌رسد. افزایش سرعت چرخشی پین، باعث افزایش دمای بیشینه در قطعه می‌شود، به این دلیل که با افزایش سرعت چرخشی، حرارت تولید شده افزایش پیدا می‌کند. افزایش دما با افزایش سرعت چرخشی، در سرعت‌های چرخشی بالا کمتر میشود، چون با افزایش دما، خاصیت ماده تغییر می‌کند و نرم‌تر می‌شود و دمای بیشینه با همان سرعت قبلی افزایش نمییابد، و در نهایت بیشینه دمای به دست آمده در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی همجنس، برابر ٪۹۰-۸۰ دمای ذوب فلز پایه می‌باشد.



شکل ۱۲- کانتور حرارتی قطعه در سرعت خطی ثابت ۳۵ mm/min و سرعت چرخشی‌های ۳۵۵ rpm و ۴۵۰ و ۵۶۰

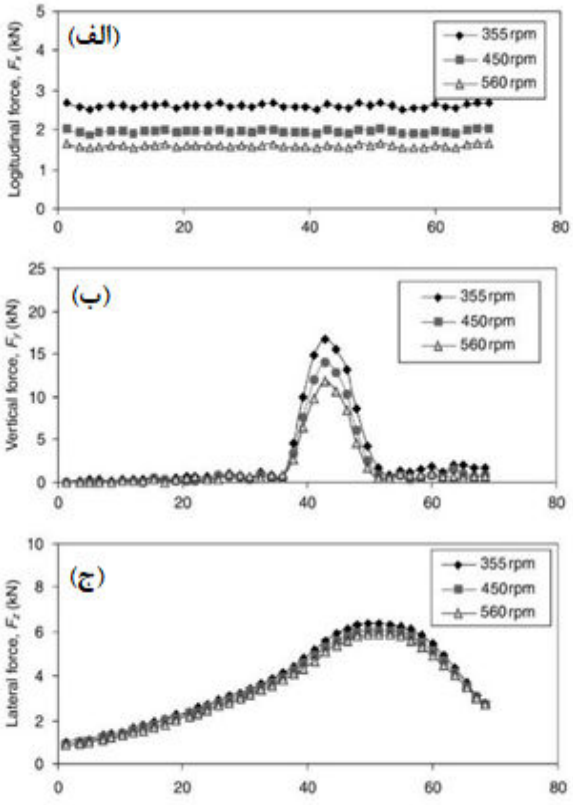
در شکل ۱۳ نمودار تغییرات ریز ساختی در مقطع دکمه جوش نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۳۵۵، ۴۵۰ و ۵۶۰ rpm و سرعت خطی ۳۵ mm/min ارائه شده است. در این نمونه‌ها سختی در آلیاژ پایه و تا نزدیک دکمه جوشی در محدوده ۷۲-۶۵ ویکرز متغیر بوده و در دکمه جوش تا ۴۸۰ ویکرز افزایش یافته است. دوران ابزار باعث ایجاد گرما در داخل ناحیه میانی جوش می‌شود. بنابراین هرچه مقدار این پارامتر افزایش یابد گرمای تولید شده بیشتر خواهد شد با زیاد شدن سرعت چرخشی ابزار، امکان مخلوط شدن مواد پلاستیک شده در ناحیه جوش افزایش خواهد یافت که این یک پارامتر مثبت محسوب می‌شود. از طرفی با افزایش سرعت چرخش پین سرعت چرخش شانه روی ابزار نیز افزایش پیدا می‌کند. این افزایش باعث ایجاد گرمای بیشتر در ناحیه بالای سطح جوشکاری خواهد شد. شانه در تولید گرما نقش بیشتری نسبت به پین بازی میکند و در حدود ۹۰ درصد از کل گرمای تولید شده توسط شانه ایجاد می‌شود. در اتصالات غیر همجنس، افزایش دمای سطح جوش احتمال تولید ساختار ترد بین فلزی در سطح جوش را افزایش خواهد داد و در نتیجه تردی سطح جوش بالا رفته و احتمال ایجاد شکست افزایش خواهد یافت. از طرفی اگر گرمای تولید شده در اثر دوران ابزار بهاندازهی کافی نباشد امکان تولید اتصال جوشی مناسب به علت کم بودن دمای مواد جریان پیدا کرده کم خواهد شد بنابراین

جوش ایجاد شده ازنظر خواص استحکامی افت می‌کند. در حالتی که سرعت دوران برابر ۲۱۰ دور بر دقیقه است. به علت کم بودن انرژی جوشکاری و گرمای تولید شده در منطقه جوش اتصال به خوبی انجام نشده است که به این دلیل است که سطح فولاد بر اثر کم بودن سرعت دوران پین به دمای مناسب و آمادگی کافی جهت ایجاد اتصال مناسب نرسیده است.



شکل ۱۳- ریز سختی در مقاطع فوقانی، میانی و ریشه جوش در نمونه‌های الف) ۳۵۵/۳۵، ب) ۴۵۰/۳۵ و ج) ۵۶۰/۳۵

با افزایش سرعت پیشروی میزان انتقال حرارت ناحیه جوش به قطعه کار کاهش یافته، بنابراین اثر فرآیند جوشکاری در ناحیه کوچکتری از کناره‌های جوش مشاهده خواهد شد. از طرف دیگر سرعت فرآیند بالا رفته و بازدهی افزایش خواهد یافت. به هنگام تغییر در سرعت پیشروی باید به این نکته توجه شود که تغییرات سرعت پیشروی باید با تغییرات در سرعت چرخشی همراه باشد. زیرا در غیر این صورت در ناحیه جوش عیوبی مانند حفره و تخلخل به وجود میآید. با کاهش سرعت پیشروی در سرعت دوران ثابت جریان پلاستیک بیش از حد خواهد شد. این امر باعث ایجاد حفره هایی در سطح کار خواهد شد. در اتصال آلیاژهای مشابه نرخ افزایش دما با افزایش سرعت چرخش ابزار کاهش می یابد. اما مشاهده میشود که در اتصال غیر هم جنس آلومینیم به فولاد، در محدوده متغیرهای انتخابی، به دلیل دمای ذوب بالاتر فولاد این گونه نیست و افزایش دما با افزایش سرعت چرخش افزایش می یابد.

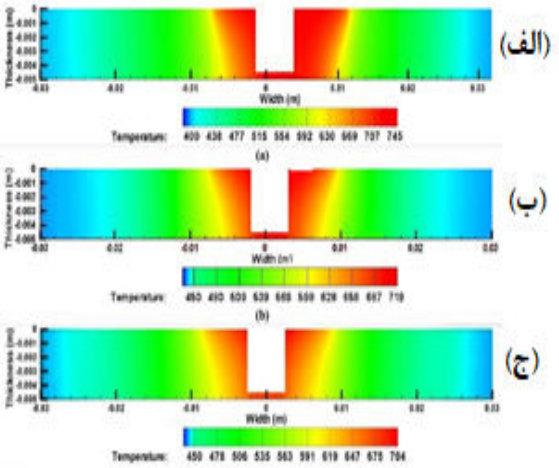


شکل ۱۴- تغییرات نیروی مکانیکی با سرعت چرخشی

سرعت چرخش ابزار مقدار حرارت تولید شده در واحد زمان، اغتشاش و اختلاط ماده در اطراف پین را تعیین می‌کند. سرعت جوشکاری یا سرعت انتقال ابزار، بیشینه دمای تولید شده در طول جوشکاری و مدت زمانی که ماده در معرض جوشکاری قرار داده میشود را کنترل می کند. در سرعت جوشکاری پایین، دکمه جوشی همگن‌تر از جوش های ایجاد شده در سرعت جوشکاری بالا است، چون حرارت ورودی در واحد طول جوش بالا منجر به توزیع دمایی یکنواخت‌تر و تبلور مجدد مؤثرتر می‌شود جوشکاری

اصطکاکی اغتشاشی در سرعت چرخش بالاتر یا سرعت جوشکاری پایین‌تر منجر به افزایش مقدار تغییر شکل پلاستیکی و افزایش دمای بیشینه در حین چرخه حرارتی فرایند می‌شود. افزایش در مقدار تغییر شکل منجر به کاهش در اندازه دانه تبلور مجدد یافته می‌شود. از سوی دیگر، افزایش در دمای بیشینه چرخه حرارتی موجب تولید دانه‌های تبلور مجدد یافته درشت می‌شود و همچنین منجر به رشد دانه‌ی قابل ملاحظه می‌گردد.

در شکل ۱۵ می‌بینیم که با اعمال آفست و ورود هرچه بیش‌تر پین به داخل فولاد دما به شدت بالا می‌رود. در حالتی که پین کاملا در آلومینیوم حرکت میکند به علت آماده نشدن سطح فولاد و کم بودن دمای سطح آن، امکان ایجاد یک اتصال مناسب میان فولاد و آلومینیوم وجود ندارد ولی با افزایش میزان آفست حجم بیش‌تری از پین وارد فولاد خواهد شد، بنابراین ذرات کنده شده از فولاد بزرگتر خواهند شد از طرفی با افزایش میزان درگیری پین با فولاد دمای فرآیند اضافه شده و امکان ایجاد ساختار ترد. بین فلزی افزایش خواهد یافت. بنابراین با افزایش میزان آفست بعد از رسیدن به مقدار بهینه کاهش شدیدی در میزان استحکام مشاهده خواهد شد. از طرفی زیاد شدن آفست در فولاد سرعت سایش ابزار را بیشتر خواهد نمود که خود مشکلاتی ایجاد خواهد کرد.



شکل ۱۵- کانتور دمایی در آفست‌های متفاوت ابزار در نمونه ۳۵۵/۸۰ در آفست‌های مختلف

رفتن دما و ایجاد مذاب در ساختار فلز جوش، ترکیبات بین فلزی ترد ایجاد خواهد شد که منجر به کاهش استحکام می‌شود. از طرفی به علت استحکام بالاتر فولاد حرکت در مرز جوش باعث سایش سریع ابزار خواهد شد که این منجر به شک ست ابزار و کاهش خواص استحکامی جوش خواهد شد. بنابراین برای جوشکاری فلزات با خواص متفاوت پین در فلز نرمتر وارد شده و با تنظیم آفست مقداری وارد فلز سختتر و با دمای ذوب بالاتر خواهد شد.

در شکل ۱۵ می‌بینیم که با اعمال آف ست و ورود هرچه بی شتر پین به داخل فولاد دما به شدت بالا میرود. در حالتی که پین کاملا در آلومینیوم حرکت میکند به علت آماده نشدن سطح فولاد و کم بودن دمای سطح آن، امکان ایجاد یک اتصال مناسب میان فولاد و آلومینیوم وجود ندارد ولی با افزایش میزان آفست حجم بیش‌تری از پین وارد فولاد خواهد شد، بنابراین ذرات کنده شده از فولاد بزرگتر خواهند شد از طرفی با افزایش میزان درگیری پین با فولاد دمای فرآیند اضافه شده و امکان ایجاد ساختار ترد. بین فلزی افزایش خواهد یافت. بنابراین با افزایش میزان آفست بعد از رسیدن به مقدار بهینه کاهش شدیدی در میزان استحکام مشاهده خواهد شد. از طرفی زیاد شدن آفست در فولاد سرعت سایش ابزار را بیشتر خواهد نمود که خود مشکلاتی ایجاد خواهد کرد.

٤ . نتیجه‌گیری

مدل سازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در نرم افزار انسیس انجام گرفت. با بررسی ذرات دیده شد که حرکت پین در طول صفحه یک منطقه اغتشاشی را در صفحه ایجاد می‌کند. این منطقه اغتشاشی سبب شده است که جوشکاری بهتر صورت گیرد. مشاهده شده است که با اعمال تنش توسط پین، ذراتی که در منطقه HAZ هستند نیز جابه‌جایی داشته و متناسب با مسیر حرکت از سطح بالایی منطقه جوشکاری وارد شده و از سطح پایین آن خارج می‌شوند. بنابراین حرکت این ذرات یک منطقه اغتشاشی کوچکتر در اطراف منطقه اغتشاشی اصلی پدید می‌آورد. مشاهده شد که کامپوزیت آلومینیم به صورت مطلوبی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شرکت می‌کند و قطعه در این فرآیند

آسیب نمی‌بیند. نتایج حاصل از شبیه سازی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، نشان دهنده این است که بیشترین دما و تنش در زیر پین است. محلی که در معرض بیش‌ترین فشار و بیشترین اصطکاک قرار دارد. دمای اولیه در این مدل‌سازی ۲۱/٦ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. شرایط اولیه مواد، یعنی شرایط انجام فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می تواند بر ساختارهای نهایی و خصوصیات مکانیکی آلیاژ جوش داده شده تأثیر بسزایی داشته باشد. بنابراین با پیش‌گرم کردن صفحه امکان بهبود فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بدون نیاز به افزایش دور پین و یا سرعت پیش‌روی آن می‌باشد. دمای بیشینه در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، در خط جوش و در زیر شانه ابزار خواهد بود. در سرعت چرخشی ۳۵۵ با افزایش سرعت خطی از ۳۵ به ۸۰، بیشینه دما از ۷۷٦ به ۷٥٤ کلوین کاهش پیدا می کند و در سرعت خطی ۳۵ با افزایش سرعت چرخشی از ۳۵۵ به ٥٦۰ دمای بیشینه از ۷۷٦ به ۷۹٥ کلوین می‌رسد.

مرجع‌ها

[۱] ج. جهانگیری, ع. فلاحی آرزودار، تأثیر پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی غیر همجنس آلومینیوم به مس بر روی ریز ساختار و خواص مکانیکی. *مجله علمی پژوهشی مهندسی ساخت و تولید ایران* .**۳** (۱۳۹٤) ٥۱.

[2] JY. Sheikh-Ahmad, DS. Ali, S. Deveci, F. Almaskari, Fahad Almaskari, and Firas Jarrar. "Friction stir welding of high density polyethylene—Carbon black composite." *Journal of Materials Processing Technology* **264** (2019) 402.

[3] W. Shen, L. Yu, H. Liu, Y. He, Z. Zhou, Q. Zhang. "Diffusion welding of powder metallurgy high speed steel by spark plasma sintering." *Journal of Materials Processing Technology* **.275** (2020) 116383.

[4] C.L. Yang, C.S. Wu, X.Q. Lv, "Numerical analysis of mass transfer and material mixing in friction stir welding of aluminum/magnesium alloys." *Journal of Manufacturing Processes*, **32** (2018) 380.

[٥] آ.فتاح الحسینی, م وکیلی, ج. بزن, تأثیر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر رفتار خوردگی آلیاژ آلومینیوم ۱۰٥۰در محلول ۳/٥ درصد وزنی کلرید سدیم. *نشریه علوم و مهندسی سطح*, **۱۲** (۱۳۹٥) ۱٥-۲٤.

[6] W. Zhang, Y. Shen, Y. Yan, R. Guo, "Dissimilar friction stir welding of 6061 Al to T2 pure Cu adopting tooth-shaped joint configuration: microstructure and mechanical properties." *Materials Science and Engineering: A.* **690** (2017) 355.

[7] M.M.Z Ahmed, S. Ataya, MMES, Seleman "Friction stir welding of similar and dissimilar AA7075 and AA5083. *Journal of Materials Processing Technology*. **242** (2017) 77.

[8] H.K. Sharma, K. Bhatt, K. Shah, U. Joshi. "Experimental analysis of friction stir welding of dissimilar alloys AA6061 and Mg AZ31 using circular butt joint geometry." *Procedia Technology*. **23** (2016) 566.

[9] I .Feddal, A. Khamlichi, K. Ameziane. "Resistance to buckling of a stiffened panel under axial compression; Effect of imperfections resulting from welding process." *Procedia Manufacturing* .**32** (2019) 921.

[10] E. Gao, X. Zhang, C. Liu, "Numerical simulations on material flow behaviors in whole process of friction stir welding." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. **11** (2018): 2324.

[11] S .Hassanifard, M. Mohammadpour, H.A. Rashid. "A novel method for improving fatigue life of friction stir spot welded joints using localized plasticity", *Materials & Design*. **53** (2014) 962.

[۱۲] ن. ابراهیمی, ف. امیدبخش، تاثیر شرایط جوشکاری بر تشکیل عیب تونلی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیم، *هشتمین کنفرانس و نمایشگاه بین المللی مهندسی مواد و متالورژی و سیزدهمین همایش ملی مشترک انجمن مهندسی متالورژی و مواد ایران و انجمن ریخته گری ایران*، تهران، انجمن مهندسی متالورژی و مواد ایران –انجمن ریخته گری ایران. (۱۳۹۸).

[13] V.A. Karkhin, A. Pittner, C .Schwenk, "Simulation of inverse heat conduction problems in fusion welding with extended analytical heat source models", *Frontiers of materials science*, **2** (2011) 119.

[14] R .Kumar, V. Pancholi, R.P. Bharti, "Material flow visualization and determination of strain rate during friction stir welding." *Journal of Materials Processing Technology* , **255** (2018) 470.

[15] V. Kumar, P. Joshi, S. Dhakar, H .Shekhar, "Analysis of the effect of sensitization on austenitic stainless steel 304L welded by GTAW process." *HCTL Open International Journal of Technology Innovations and Research (IJTIR)* **14** (2015) 2321.

[١٦] ح. آقاجانی, ن. کردانی, ح. آقاجانی دارزکلا, تحلیل اثر سرعت خطی و دورانی ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر جریان مواد اتصال T شکل آلیاژ آلومینیوم ٦۰٦۱. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*, **۱** (۱۳۹۸) ۱.

[17] W. Li, A. Vairis, M. Preuss, T. Ma, "Linear and rotary friction welding review." *International Materials Reviews*, **2** (2016) 71.