نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره1، بهار و تابستان 1399، صفحه 17-9

بررسی اثر سرعت دورانی ابزار بر فرایند انتقال مواد در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم خالص تجاری

رامین دلیر نظرلو، فراز امیدبخش *، جواد ملایی میلانی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز.

(دریافت مقاله: 1398/02/01 ؛ پذیرش مقاله: 1398/09/24)

چکیده

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از روش‌هایی است که در اتصال قطعات آلومینیومی به عنوان روشی اقتصادی و با کیفیت مطرح است. یکی از عوامل تاثیرگذار بر کیفیت مقطع جوش فراوری‌شده به کمک این روش جوشکاری، فرایند انتقال مواد در حین حرکت ابزار در طول خط جوش است. انتقال مواد در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شامل انتقال عمودی و افقی مواد حول پین ابزار است که ناشی از نیروهای فورج و اکستروژن این انتقال می‌باشد. در مقابل، فورج و اکسترود به ترتیب تحت تاثیر مستقیم زاویه و شکل ابزار هستند و پارامترهای سرعت حرکت و دوران ابزار به صورت غیرمستقیم بر هر دو سازوکار تاثیر می‌گذارند. در این پژوهش تاثیر سرعت دورانی ابزار با سرعت پیشروی ثابت، در جوشکاری لب به لب آلومینیوم خالص تجاری، مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور کیفیت جوش‌های حاصل توسط روش های عکس برداری دیجیتالی، رادیوگرافی، متالوگرافی، ریزسختی سنجی و مقاومت الکتریکی بررسی شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش سرعت دورانی در سرعت پیشروی ثابت، سبب افزایش میزان مواد انتقال یافته در ناحیه جوش می‌شود و در نتیجه عیوب به وجود آمده در ناحیه جوش کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، سازوکار انتقال مواد، رادیوگرافی، آلومینیوم خالص تجاری

Effect of rotational speed on the material transfer mechanism in friction stir welding of commercial pure aluminum

R. Delir Nazarlou, F. Omidbakhsh*, J. Mollaei Milani

Department of Mechanical Engineering, Islamic Univeristy of Tabriz, Tabriz, Iran

(Received 11 May 2019 ; Accepted 15 December 2019)

Abstract

Friction stir welding (FSW) is an economic and high quality technique for welding and joining of aluminum parts. The most important factor in the soundness of weldment proceesed by this type of welding process, is the mechanism of material transfer during tool rotation. The materials transfer during the welding process involves horizontal and vertical movement that caused by extrusion process and forging force. On the other hand, the tilt angle and shape of the pin affect the extrusion and forging processes, respectively. In this study, the effect of rotational speed at a constant welding speed during butt welding of pure commercial aluminum was investigated. The welded zones were investigated by using digital photographic experiments, radiography, metallugraphy, microhardness, and electrical resistivity tests. The results of the expriments showed that an increase in the rotational speed resluted in an increase in the amount of materials transfer in the weld zone and so the defects formed in the weld zone were decreased.

Keywords: Friction stir welding, Material flow mechanism, Radiography, Pure commercial aluminum.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: F.omidbakhsh@gmail.com

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

1- مقدمه

فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از روش‌های اتصال حالت جامد است که به دلیل دمای پایین در ناحیه جوش، مانع ایجاد عیوبی هم‌چون ترک، اعوجاج و دیگر عیوب می‌شود که می‌تواند در جوشکاری ذوبی ایجاد شوند [1]. علاوه بر این خصوصیات به دلیل کاهش حجم عناصر بین‌فلزی و ضخامت پایین این لایه‌ها روش مناسبی برای اتصال بین مواد غیرهم‌جنس می‌تواند درنظر گرفته شود [2]. این فرایند به دلیل دارابودن مزایایی از قبیل بالابودن استحکام کششی ناحیه جوش، عدم استفاده از مواد مصرفی، بازده انرژی بالا و سرعت بالای تولید دارای کاربردهای زیادی در صنایع خودروسازی و الکترونیک است [3]. برای دستیابی به اتصالی مطلوب و عاری از عیوب باید انتقال مواد، که در نتیجه حرکت ابزار است، به صورت کامل انجام شود [4]، زیرا اختلاط مواد در طول فرایند جوشکاری درنتیجه حرکت افقی و عمودی مواد در حین عبور ابزار از ناحیه جوش است. این اختلاط شامل حرکت و انتقال مواد از ناحیه پیش‌رونده[1] به ناحیه پس‌رونده[2] و همچنین از جلو ابزار به پشت ابزار می‌باشد. لذا برای تولید یک جوش بدون عیب از نظر ساختار داخلی ناحیه جوشکاری شده و شکل ظاهری محل اتصال، انتقال مواد باید در تمامی جهات به گونه‌ای انجام گیرد که موازنه جرم بین مناطق مختلف جوش پایدار بماند. موازنه جرم تابع پارامترهایی هم‌چون شکل ابزار، سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زاویه ابزار است که با کمک بهینه‌سازی این پارامترها می‌توان از عیوب ظاهری و البته عیوب داخلی در جوشکاری جلوگیری کرد [5-9]. نتیجه تحقیقات هو و همکارانش [10] بر روی آلیاژ $6061\text{-}T_6$ نشان داده است که با افزایش سرعت دورانی در بازه 400 الی 600 دور بر دقیقه استحکام کششی ناحیه جوش نیز افزایش می‌یابد. اما افزایش بیش از حد سرعت دورانی سبب کاهش استحکام کششی می‌شود. این مورد ناشی از شکل‌گیری فضای خالی در ناحیه جوش به دلیل افزایش و یا کاهش میزان انتقال مواد است. تحقیقات دیناهاران و همکاران [11]، بر روی اتصال آلیاژ آلومینیوم ریخته‌گری‌شده با آلومینیوم نوردشده نشان داد که با افزایش سرعت دورانی استحکام کششی نیز افزایش می‌یابد که دلیلی بر افزایش مقدار انتقال مواد در ناحیه جوش است. هم‌چنین، نتیجه تحقیقات تریمبل و همکارانش [12] نمایانگر این مسئله است که با افزایش سرعت دورانی در سرعت پیشروی ثابت، استحکام کششی ناحیه جوش نسبت به فلز پایه در آلیاژ $2024\text{-}T_3$ افزایش می‌یابد. اما با افزایش بیش از حد سرعت دورانی با کاهش استحکام کششی روبه‌رو خواهیم بود و همواره مقدار استحکام کششی با سازوکار انتقال مواد در طی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در ارتباطی مستقیم است. البته تاثیر سایر پارامترهای جوشکاری بر روی سازوکار انتقال مواد از جمله زاویه ابزار و شکل هندسی ابزار نیز در تحقیقاتی مورد بررسی قرار گرفته شده است [13 و 14]. با توجه به اهمیت سازوکار انتقال مواد در کنترل فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، در این پژوهش سعی شده است تا با کمک روش های عکس‌برداری دیجیتالی از سطح، رادیوگرافی، متالوگرافی، ریزسختی‌سنجی و مقاومت الکتریکی ناحیه اتصال تاثیر سرعت دورانی ابزار در سرعت پیشروی ثابت مورد مطالعه قرار گیرد.

2- مواد و روش انجام تحقیق

در این پژوهش از آلیاژ آلومینیوم 1080، دارای ترکیب شیمیایی مندرج در جدول (1)، استفاده شده است. نمونه‌ها در جهت نورد و در ابعاد 10×50×250 میلی‌متر به کمک وایرکات برش داده و سپس پلیسه‌ها با کمک سنباده‌زنی حذف شدند. در شکل (1) طرح‌واره‌ای از چگونگی فرایند جوشکاری و حرکت ابزار نشان داده شده است.در این پژوهش از ابزار استوانه‌ای از جنس فولاد ابزار گرم‌کار (H13) با مقدار سختی 52 HRC، استفاده شد که در شکل (2) طرح‌واره‌ای از ابزار مورد استفاده نشان‌داده شده است.

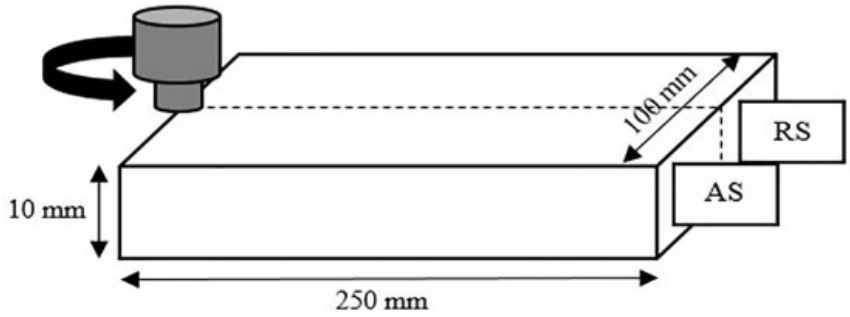
۱ - Advancing Side

۲ - Retreating Side

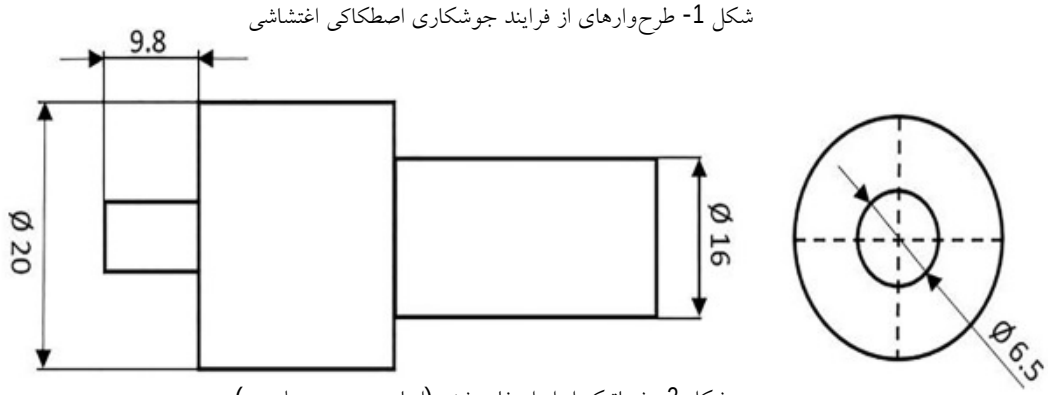
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

جدول 1- ترکیب شیمیایی آلومینیوم 1080

Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Cr %	Ni %	Ti %	Be %	Ca %
0.08	0.14	0.01	0.007	0.03	0.01	0.005	0.007	0.012	None	Trace
Pb %	Sn %	Sr %	V %	Na %	Bi %	Zr %	B %	Ga %	Li %	Al %
Trace	< 0.002	None	0.013	Trace	< 0.003	0.005	0.0005	0.01	None	Base



شکل 1- طرح‌وارهای از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی



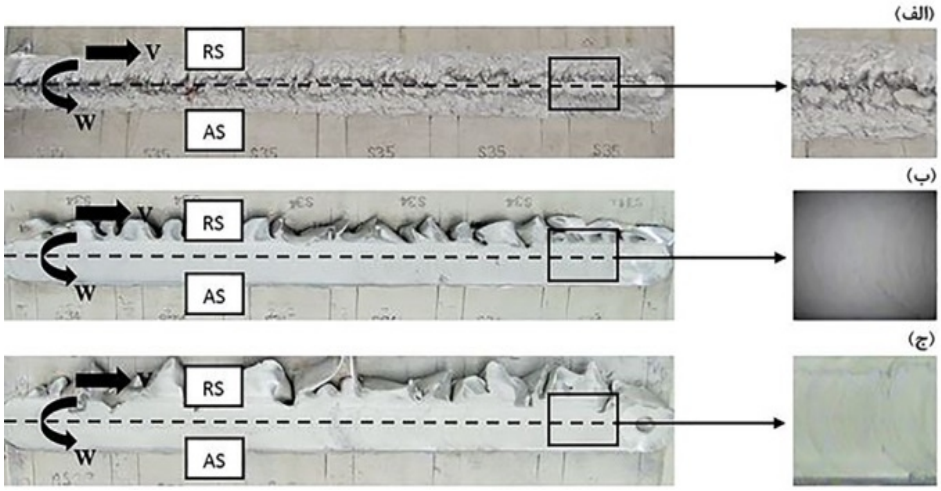
شکل 2- شماتیک ابزار استفاده شده (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

در این تحقیق، با استفاده از سه سرعت بعد از انجام فرایند جوشکاری ابتدا سطح نمونه‌ها و سپس قسمت پشتی آن‌ها مورد بررسی قرارگرفت و سپس با استفاده از آزمون رادیوگرافی قسمت داخلی ناحیه جوش نیز ارزیابی شد. در ادامه، مقطع عرضی جوش تحت بررسی‌های متالوگرافی قرارگرفت. بدین منظور ابتدا سطح مقطع تهیه‌شده با استفاده از سنباده‌های SiC از شماره 100 تا 3000 و سپس با پولیش مکانیکی آماده سازی شد. سطوح آماده‌شده توسط محلول اچ کلر ($3\%HF+6\%HCl+6\%HNO_3+85\%H_2O$) حکاکی شدند بررسی‌های ریزساختاری بر روی آن‌ها صورت گرفت. در مرحله بعدی نمونه‌ها توسط دستگاه سختی‌سنج برینل با ساچمه کاربید تنگستنی و نیروی 60 کیلوگرم، تحت آزمایش ریزسختی‌سنجی قرار گرفتند. در این مرحله ریزسختی ناحیه اتصال در سه مرحله اندازه‌گیری شد و میانگین اعداد به دست‌آمده به عنوان معیاری برای مقدار ریزسختی ناحیه درنظر گرفته شد. به منظور بررسی تاثیر فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی مقاومت الکتریکی با استفاده از دستگاه 4 پروب مدل FPP500 مقاومت الکتریکی ناحیه جوش اندازه‌گیری شد. به منظور انجام این آزمایش محل جوش نمونه‌ها تحت برش عرضی قرار گرفتند و پس از علامت‌گذاری، طی4 مرحله مقاومت الکتریکی ناحیه جوش مورد بررسی قرار گرفت. درنهایت، میانگین این 4 مرحله به

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

جدول 2- پارامترهای جوشکاری مورد بررسی

شماره نمونه	سرعت پیشروی (mm/min) (V)	سرعت دورانی(rpm) (W)
۱	۲۵۰	۴۵۰
۲	۲۵۰	۹۰۰
۳	۲۵۰	۱۱۲۰



شکل 3- سطح ظاهری نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت دورانی الف)450، ب) 900 و ج)1120 دور بر دقیقه

مورد بررسی قرار گرفت. درنهایت، میانگین این 4 مرحله به عنوان مقاومت الکتریکی ناحیه جوش و نشان دهنده کیفیت اختلاط مواد انتقال یافته در ناحیه اتصال مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته شده است.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی تاثیر افزایش سرعت دورانی بر سطح ظاهری جوش در ناحیه اتصال

پس از فرایند جوشکاری ابتدا سطح ظاهری نمونه‌های جوشکاری شده مورد بررسی قرارگرفت. با توجه به این‌که حرکت دورانی ابزار در مسیر خط اتصال سبب به وجود آمدن کمان‌هایی در سطح ظاهری جوش[1] می‌شود و فاصله این کمان‌ها نشان دهنده میزان اخلاط مواد در هر دوران ابزار را نشان می‌دهد. لذا با افزایش سرعت دورانی در سرعت پیشروی ثابت به دلیل کاهش گام ابزار[2] که از نسبت بین سرعت پیشروی به سرعت دورانی (W/V) حاصل می‌شود، به طبع آن میزان انتقال مواد افزایش می‌یابد و فاصله این کمان‌ها نسبت یک‌دیگر کاهش می‌یابد [15]. زیرا با افزایش سرعت دورانی ابزار (W) میزان اصطکاک بین سطح قطعه کار و شانه ابزار افزایش می‌یابد و در نتیجه حرارت ناشی از این اصطکاک سبب افزایش میزان تغییرشکل مومسان می‌شود. در ادامه این حالت باعث افزایش میزان انتقال مواد می‌شود [11]. البته به‌منظور کاهش نسبت V/W، میزان سرعت پیشروی ابزار نیز باید کاهش یابد. در نتیجه این موجب کاهش مدت زمان حرکت ابزار و هم‌چنین افزایش میزان اصطکاک می‌شود. در نهایت، حرارت ناحیه جوش و تغییرشکل مومسان ناشی از این افزایش دما، سیری صعودی خواهد داشت که سبب افزایش میزان اختلاط مواد می‌شود [16]. همان‌گونه که در شکل (3) مشاهده می‌شود، افزایش سرعت دورانی تاثیر مستقیم بر جریان انتقال مواد داشته است، به گونه‌ای که با افزایش سرعت دورانی در سرعت پیشروی ثابت، میزان انتقال مواد در ناحیه جوش افزایش یافته است. مطابق با شکل (3-الف)، مشاهده می‌شود

۳ - Onion Rings

۴ - Tool-Pitch

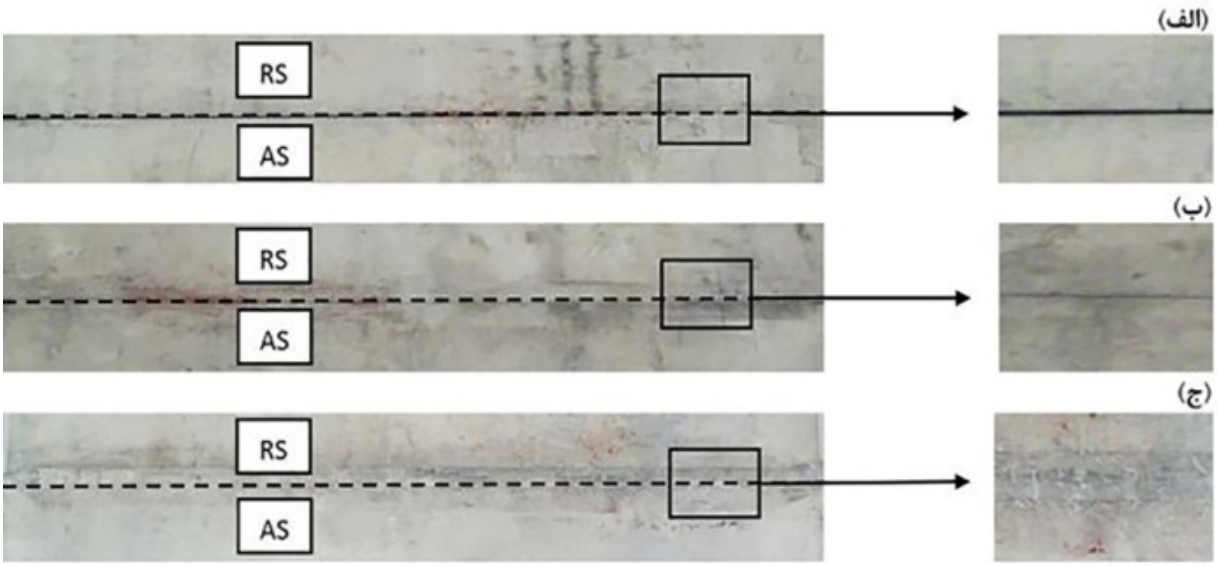
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

که در سرعت دورانی 450 دور بر دقیقه به دلیل نامناسب‌بودن میزان گام ابزار، عدم اختلاط مناسب در ناحیه اغتشاش و عدم هماهنگی بین سرعت دورانی و سرعت پیشروی، میزان تغییرشکل مومسان ناحیه اتصال ناشی از این حرارت ورودی کافی نبوده و در نتیجه هیچ اتصالی در ناحیه جوش صورت نگرفته است. اما با افزایش سرعت دورانی، مطابق با در شکل‌های (3-ب) و (3-ج)، اتصال با موفقیت ایجاد شده است. با مقایسه شکل‌های (3-ب) و (3-ج) نیز مشاهده می‌شود که کمان‌های ظاهری با افزایش سرعت دورانی به یک‌دیگر فشرده‌تر شده‌اند. کاهش فاصله این الگوهای ظاهری در سطح نمونه جوشکاری‌شده نشان دهنده افزایش میزان انتقال مواد در ناحیه جوش است (شکل (3)).

به منظور بررسی جریان انتقال مواد در قسمت ریشه جوش، می‌توان از پشت نمونه‌های جوشکاری‌شده (یعنی درز اتصال) استفاده نمود، زیرا نمایان‌شدن درز اتصال موجود در پشت نمونه، نشان دهنده عدم اتصال در ریشه جوش است. این عدم اتصال که از عدم وجود اختلاط مناسب مواد در ریشه جوش حاصل می‌شود، ناشی از نبودن حرارت کافی و عدم هماهنگی بین پارامترهای اعمالی است. درواقع عوامل ذکرشده باعث می‌شود تغییرشکل مومسان به میزان کافی در ناحیه اتصال رخ ندهد و سبب عدم اتصال در قسمت ریشه جوش شود.

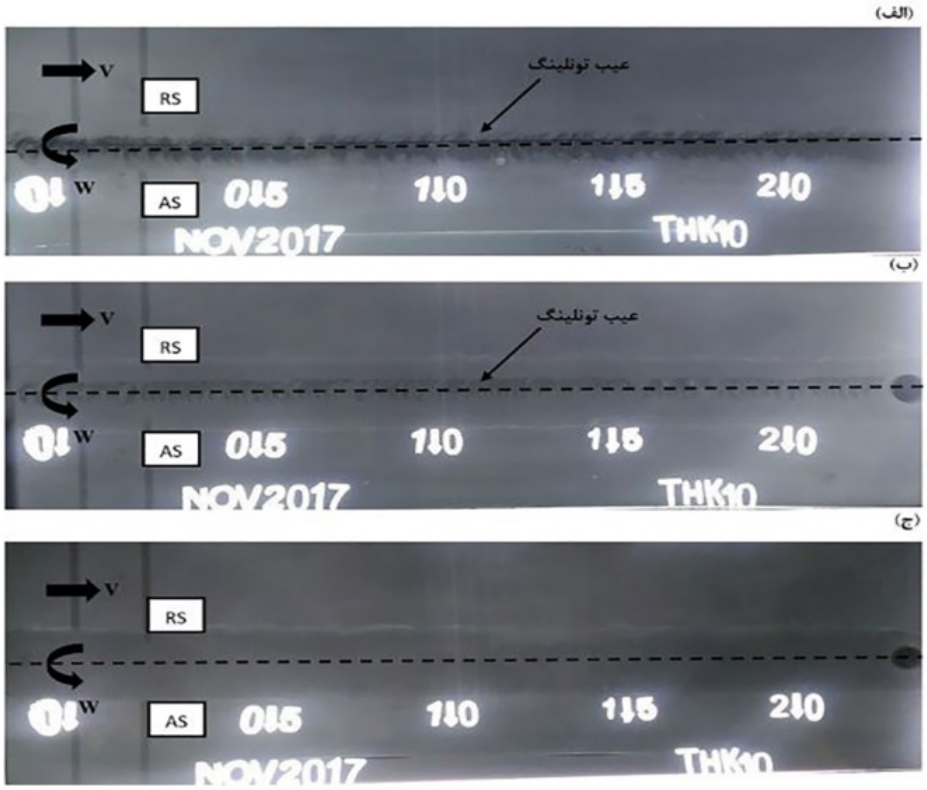
در شکل (4) مشاهده می‌شود که افزایش سرعت دورانی سبب شده است تا میزان اختلاط مواد، به دلیل افزایش تغییرشکل مومسان ناشی از افزایش حرارت ورودی، افزایش یابد. در شکل (4-الف) مشاهده می‌شود که درز اتصال قابل رویت است، اما در شکل‌های (4-ب) و (4-ج) با افزایش سرعت دورانی و ثابت ماندن سرعت پیشروی، خط اتصال کم‌کم از بین رفته است. این را می‌توان به افزایش حرارت ورودی ناشی از افزایش سرعت دورانی و درنتیجه افزایش میزان تغییرشکل مومسان نسبت داد که موجب می‌شود اختلاط مواد در ناحیه ریشه جوش به صورت کامل انجام پذیرد.

جهت بررسی میزان انتقال مواد در قسمت داخلی ناحیه جوش از آزمون رادیوگرافی استفاده شد که در شکل (5) نتایج آن نشان داده شده است. با توجه به شکل (5) مشاهده می‌شود که میزان اختلاط مواد در قسمت داخلی جوش نیز با افزایش سرعت دورانی در سرعت پیشروی ثابت بهبود می‌یابد. در شکل (5-الف) عدم اتصال و فضای خالی در سراسر قسمت داخلی ناحیه جوش نیز قابل مشاهده است. با توجه به این‌که در سطح ظاهری جوش هیچ عیبی مشاهده نمی‌شود، می‌توان نتیجه گرفت با افزایش سرعت در قسمت داخلی جوش، مطابق با شکل (5-ب)، عدم اختلاط مناسب مواد به دلیل عدم هماهنگی و یا نبود حرارت کافی جهت تغییرشکل مومسان،



شکل 4- سطح پشتی نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت دورانی الف)450، ب) 900 و ج)1120 دور بر دقیقه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]



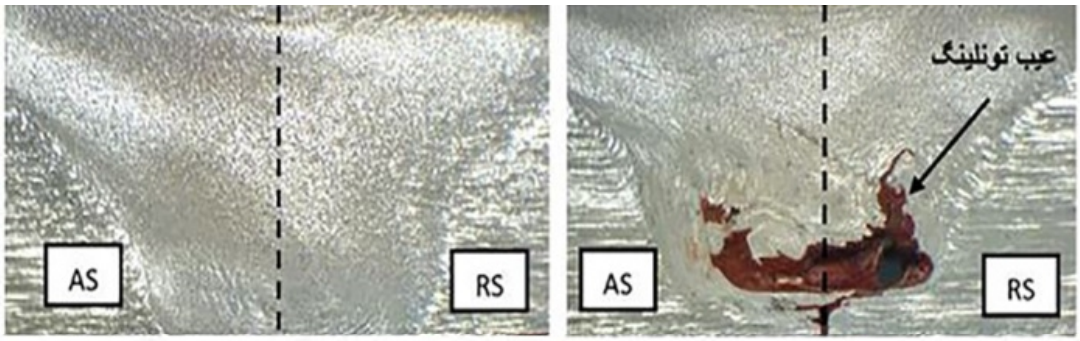
شکل 5- تصاویر رادیوگرافی از نمونه‌های جوشکاری‌شده با سرعت دورانی الف) 450، ب) 900 و ج)1120 دور بر دقیقه

سبب به وجود آمدن فضاهای خالی شده است. اما مشاهده می‌شود که میزان اختلاط مواد با توجه به فضاهای خالی به وجود آمده در شکل (5-ب) نسبت به میزان عیب به وجود آمده در شکل (5-الف) کاهش یافته است. این روند نزولی در فضاهای خالی به وجود آمده نشان دهنده افزایش میزان اختلاط مواد هست. اما با افزایش سرعت دورانی، طبق شکل (5-ج)، مشاهده می‌شود هیچ عیبی در قسمت داخلی جوش ایجاد نشده و اختلاط مواد به صورت قابل‌قبول صورت گرفته است. با توجه به شکل ظاهری و پشتی ناحیه جوش و از عکس رادیوگرافی به وضوح تاثیر سرعت دورانی ابزار و نیروی فورج بر افزایش میزان اختلاط مواد قابل مشاهده است.

3-3- بررسی تاثیر افزایش سرعت دورانی بر روی ماکروساختار ناحیه اتصال

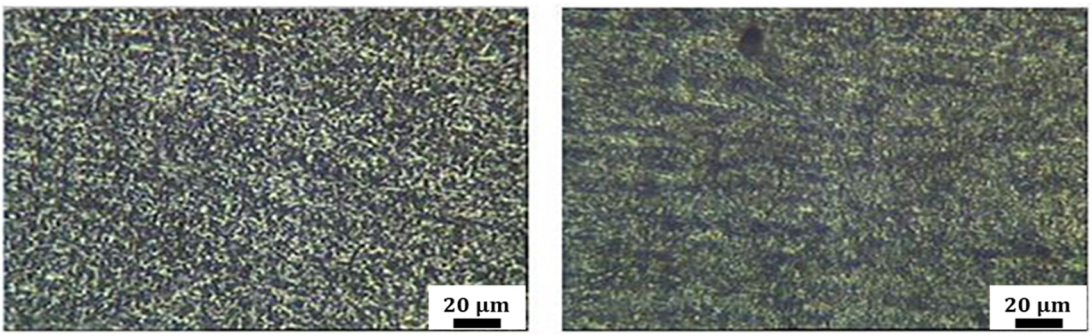
به منظور بررسی اثرات سرعت دورانی بر روی ماکروساختار ناحیه جوش این ناحیه به صورت عرضی برش داده شد و بعد از فرایند حکاکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد با افزایش سرعت دورانی بهبود جریان اختلاط مواد در ناحیه اتصال ایجاد شده است. در نمونه اول که با سرعت دورانی 450 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 250 میلی‌متر بر دقیقه جوشکاری شده است، طبق شکل (3-الف)، هیچگونه اتصالی در ناحیه جوش ایجاد نشده است و به همین دلیل بر روی این نمونه فرایند حکاکی انجام نگرفت. اما مطابق با شکل (6) مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت دورانی عیوب به وجود آمده در ناحیه جوش با افزایش میزان انتقال مواد رفع شده است. با توجه به شکل (6-الف) که طبق جدول (2) مربوط به نمونه شماره 2 است، مشاهده می‌شود که عیب تونلینگ (فضاهای خالی نمایان‌شده) ایجاد شده است. در شکل (5-ب) عیب ایجادشده و شکل‌گرفته در طول ناحیه جوش به وضوح قابل مشاهده هست. همان‌گونه که مشاهده می‌شود جریان انتقال مواد در سطح بالای ناحیه جوش به خوبی انجام پذیرفته است، اما در ناحیه ریشه جوش به دلیل عدم انتقال حرارت مناسب و نبود میزان تغییرشکل مومسان مورد نیاز، اختلاط مواد کاهش یافته و عیب تونلینگ به وجود آمده است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]



ب) الف)

شکل 6- تصاویر ماکروساختار از ناحیه اتصال نمونه جوشکاری‌شده با سرعت دورانی الف) 900 و ب)1120 دور بر دقیقه



ب) الف)

شکل 7- تصاویر ریزساختار از ناحیه اتصال نمونه جوشکاری‌شده با سرعت دورانی الف) 900 و ب)1120 دور بر دقیقه

3-4- بررسی تاثیر افزایش سرعت دورانی بر ریزساختار ناحیه اتصال

در بررسی ریزساختار ناحیه جوش طبق تحقیقات انجام‌شده [8، 17 و 18]، با توجه به اینکه میزان تغییرات در ریزساختار ناحیه اتصال به دلیل تبلور مجدد ناشی از فرایند اعمالی و آلیاژ مورد استفاده (آلومینیوم سری 1000) نامحسوس است، لذا با مقایسه تصاویر به دست آمده، طبق شکل (7)، مشاهده میشود که تغییر چندانی در اندازه دانه ها حاصل نشده است.

3-5- بررسی ریزسختی ناحیه اتصال

پس از بررسی‌های ریزساختاری تاثیر افزایش سرعت دورانی بر ریزسختی ناحیه اتصال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد (جدول (3)) با افزایش میزان اختلاط مواد، در نتیجه افزایش تغییرشکل مومسان حاصل از افزایش سرعت دورانی و هم‌چنین افزایش حرارت ورودی، ریزسختی ناحیه اتصال نیز افزایش می‌یابد.

3-6- جریان انتقال مواد و مقاومت الکتریکی

در این تحقیق با استفاده از جریان الکتریکی میزان مواد انتقال‌یافته مورد بررسی قرار گرفت، به طوری که با بهبود جریان انتقال مواد میزان فضای خالی در ناحیه جوش کاهش یافت و سبب کاهش میزان عیوب ایجادشده در ناحیه جوش شد. عبور جریان الکتریکی از ناحیه جوش، به دلیل یکنواخت‌بودن این ناحیه، جریان عبوری با مقاومت کمتری روبرو می‌شود که در نهایت سبب کاهش میزان مقاومت الکتریکی در ناحیه جوش می‌شود [19-21].

همان‌گونه که در جدول (4) مشاهده می شود با افزایش سرعت دورانی میزان مقاومت الکتریکی نیز کاهش می‌یابد که این در نتیجه افزایش اختلاط مواد است. لازم به ذکر است که تصاویر سطحی، رادیوگرافی و ماکروساختار نشان داد که افزایش سرعت دورانی باعث افزایش میزان اختلاط مواد شده است. نتایج آزمون مقاومت الکتریکی نیز موید همین موضوع هست.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

جدول 3- نتایج آزمون ریزسختی سنجی در نمونه‌های مختلف

شماره نمونه	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت دورانی (rpm)	میزان ریز سختی ناحیه اتصال (HV)	میانگین ریز سختی (HV)
۱	۲۵۰	٤٥٠	عدم اتصال	-
۲	۲۵۰	۹۰۰	٦٦/٨ و ٦٧/٣ و ٦٧/٧	٦٧/٢
۳	۲۵۰	۱۱۲۰	٦٩/٤ و ٦٩/٨ و ٦٩	٦٩/٤

جدول 4- میزان مقاومت الکتریکی در نمونه‌های مختلف

شماره نمونه	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت دورانی(rpm)	میزان مقاومت الکتریکی(Ω/cm)
۱	۲۵۰	٤٥٠	عدم اتصال
۲	۲۵۰	۹۰۰	۰/۵۲٦x۱۰$^{-۵}$
۳	۲۵۰	۱۱۲۰	۰/۱۲۱x۱۰$^{-۵}$

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اتصال آلومینیوم خالص تجاری به صورت لب به لب در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی صورت گرفت و نتایج زیر به دست آمد:

- با افزایش سرعت دورانی در سرعت پیشروی ثابت، کمان‌های ظاهری در سطح به یک‌دیگر فشرده شدند که ناشی از افزایش میزان اختلاط مواد، در نتیجه افزایش حرارت ورودی و تغییرشکل مومسان است.

- میزان اختلاط مواد با افزایش سرعت دورانی در سرعت پیشروی ثابت، در قسمت داخلی ناحیه جوش، به دلیل افزایش دما و تغییرشکل مومسان ایجادشده، نیز افزایش یافت و در نتیجه عیوب ایجاد شده در این ناحیه نیز کاهش یافت.

- با افزایش سرعت دورانی تغییر قابل ملاحظه‌ای در اندازه دانه ناحیه اتصال حاصل نشد.

- میزان ریزسختی ناحیه اتصال با میزان اختلاط مواد رابطه مستقیم داشت، به طوری که با افزایش تغییرشکل مومسان ناشی از افزایش سرعت دورانی و افزایش حرارت ورودی، میزان ریزسختی ناحیه اتصال افزایش یافت.

- افزایش میزان مواد انتقال‌یافته ناشی از افزایش سرعت دورانی سبب کاهش عیوب در ناحیه جوش شد و در نهایت میزان مقاومت الکتریکی در ناحیه اتصال کاهش یافت.

منابع

[1] Tongne, A., et al., On material flow in friction stir welded al alloys. Journal of Materials Processing Technology, 2017. 239: p. 284-296.

[2] Kimapong, K. and T.J.M.t. Watanabe, Effect of welding process parameters on mechanical property of FSW lap joint between aluminum alloy and steel. 2005. 46(10): p. 2211-2217.

[3] Mishra, R.S., P.S. De, and N. Kumar, Friction stir welding and processing: science and engineering. 2014: Springer.

[4] Edwards, P.D. and M. Ramulu, Material flow during friction stir welding of Ti-6Al-4V. Journal of Materials Processing Technology, 2015. 218: p. 107-115.

[5] Cavaliere, P., et al., Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of dissimilar AA6082–AA2024 joints produced by friction stir welding. Materials & Design, 2009. 30(3): p. 609-616.

[6] Ericsson, M. and R. Sandström, Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG. International Journal of Fatigue, 2003. 25(12): p. 1379-1387.

[7] Guerra, M., et al., Flow patterns during friction stir welding. Materials characterization, 2002. 49(2): p. 95-101.

[8] Hirasawa, S., et al., Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method. Journal of materials processing technology, 2010. 210(11): p. 1455-1463.

[9] م. زاده، س. یزدی و صفرخانیان, بررسی تجربی سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر میکرو سختی و ریز ساختار آلیاژ آلومینیوم 5456 در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی. مکانیک سازه ها و شاره ها, 2013.

[10] Hou, J., H. Liu, and Y.J.T.I.J.o.A.M.T. Zhao, Influences of rotation speed on microstructures and mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy joints

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

AA7075–T6 butt joints: numerical simulations and experimental verifications. Science and Technology of Welding and Joining, 2006. 11(4): p. 412-421.
[17] Dubourg, L., et al., Process optimisation and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin. 2010. 31(7): pp. 3324-3330.
[18] Fakih, M.A., et al. Detection and assessment of flaws in friction stir welded metallic plates. in Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2017. 2017. International Society for Optics and Photonics.
[19] Shakoor, A. and Z. Zhenggan, Investigation of 3D anisotropic electrical conductivity in TIG welded 5A06 Al alloy using eddy currents. Journal of Materials Processing Technology, 2011. 211(11): p. 1736-1741.
[20] Ari, M., et al., Microstructure and thermo-electrical transport properties of Cd–Sn alloys. Materials Characterization, 2008. 59(5): p. 624-630.
[21] Bautista, J., et al., Correlations between mechanical stress, electrical conductivity and nanostructure in Al films on a polymer substrate. Materials Characterization, 2010. 61(3): p. 325-329.
fabricated by self-reacting friction stir welding tool. 2014. 73(5-8): p. 1073-1079.
[11] Dinaharan, I., et al., Effect of material location and tool rotational speed on microstructure and tensile strength of dissimilar friction stir welded aluminum alloys. archives of civil and mechanical engineering, 2012. 12(4): p. 446-454.
[12] Trimble, D., G. O'Donnell, and J. Monaghan, Characterisation of tool shape and rotational speed for increased speed during friction stir welding of AA2024-T3. Journal of Manufacturing processes, 2015. 17: p. 141-150.
[13] Kumar, K. and S.V. Kailas, The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation. Materials Science and Engineering: A, 2008. 485(1-2): p. 367-374.
[14] Galvão, I., et al., Influence of tool shoulder geometry on properties of friction stir welds in thin copper sheets. 2013. 213(2): p. 129-135.
[15] Krishnan, K., On the formation of onion rings in friction stir welds. Materials science and engineering: A, 2002. 327(2): p. 246-251.
[16] Fratini, L., et al., Material flow in FSW of

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]