E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 11, Number 2, 2026

Effect of FSSW parameters on the microstructure and mechanical properties of 5754 aluminum alloy

M. Ansari Lale[1], M.N. Yoozbashi[2*], M. Zadshakoyan[3], A. Almasi[3]

1- Mechanical Engineering Department, The National University of Skills, Tabriz, Iran.
2- Materials Engineering Department, University of Applied Science and Technology, Tehran, Iran.
3- Mechanical Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Received 3 July 2025 ; Accepted 28 August 2025

Abstract

The friction stir spot welding (FSSW) process is a solid-state welding technique recognized as one of the most significant advancements in metal joining over the past decade. In this study, the effects of rotational speed and tool contact time, with a unique design different from previous research, on the microstructure and mechanical properties of 5754 series aluminum alloy were investigated. The workpiece was clamped using a specialized fixture on a radial drilling machine, and welding operations were performed using a FSSW machine at different rotational speeds and various tool contact times. Subsequently, the microstructure, microhardness, and tensile-shear strength of the welded spot region were evaluated. The results showed that increasing the tool rotational speed and prolonging the tool contact time led to an improvement of approximately 105% in the tensile-shear strength. According to statistical analyses, the factors of rotational speed and tool contact time significantly affected the shear strength with a confidence level greater than 95%; however, statistical analyses revealed different results regarding the relationship between rotational speed, contact time, and hardness.

Keywords: Aluminum Alloy 5754, Friction Stir Spot Welding (FSSW), Microstructure, Mechanical Properties.

*Corresponding Author: M.N. Yoozbashi, n.yoozbashi@uast.ac.ir.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-28]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال یازدهم، شماره2، پاییز و زمستان 1404

تأثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم سری 5754

مسعود انصاری لاله[1]، میر نریمان یوزباشی[2*]، محمد زادشکویان[3]، علی الماسی[3]

1- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تبریز، ایران.

2- گروه مهندسی مواد، دانشگاه جامع علمی کاربردی، تهران، ایران.

3- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

دریافت مقاله: 1404/04/12 ؛ پذیرش مقاله: 1404/06/06

چکیده

فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای یکی از روش‌های جوشکاری حالت جامد است که به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌ها در اتصال فلزات در دهه اخیر شناخته شده است. در این پژوهش، تأثیر سرعت دوران و زمان تماس ابزار با طراحی خاص و متفاوت با تحقیقات قبلی بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم سری 5754 مورد بررسی قرار گرفته است. قطعه کار با استفاده از نگهدارنده مخصوص بر روی دستگاه سوراخ‌کاری رادیال گیره‌بندی شد و عملیات جوشکاری با استفاده از دستگاه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در سرعت‌های دورانی متفاوت و زمان‌های تماس ابزار مختلف انجام گرفت. در ادامه ریزساختار، ریزسختی و نیروی کششی - برشی منطقه نقطه جوش مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد افزایش سرعت دوران ابزار و افزایش زمان تماس ابزار، بهبود نیروی کششی- برشی به میزان حدود 105% را در پی داشته است. مطابق تحلیل‌های آماری فاکتورهای سرعت دوران و زمان تماس ابزار با سطح اطمینان بیشتر از 95% بر مقدار نیروی برشی مؤثر هستند؛ در حالی‌که مطابق تحلیل‌های آماری، ارتباط بین سرعت دوران و زمان تماس با سختی، نتایج متفاوتی در پی داشته است.

کلمات کلیدی: آلیاژ آلومینیوم 5754، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، ریزساختار، خواص مکانیکی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: میرنریمان یوزباشی، n.yoozbashi@uast.ac.ir.

1- مقدمه

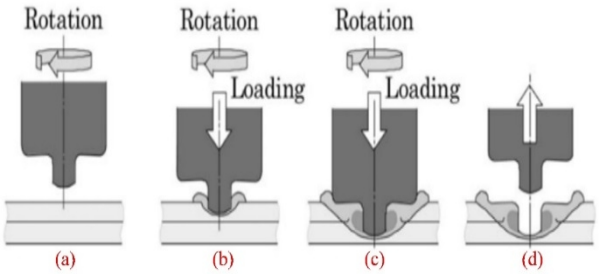
مواد فلزی مورد استفاده در صنعت هوافضا شامل آلیاژهای آلومینیوم [1]، آلیاژهای منیزیم [2-7]، آلیاژهای تیتانیوم [8-10]، آلیاژهای فولاد و سوپرآلیاژهای پایه نیکل می‌شوند. این مواد را می‌توان به مواد با دمای نرم شدن پایین (آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم) و مواد با دمای نرم شدن بالا (سوپرآلیاژهای پایه نیکل، آلیاژهای فولاد و آلیاژهای تیتانیوم) طبقه‌بندی کرد. در طول فرایندهای تولید سازه‌های هوافضا، همه انواع مواد نیاز

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-28]

به جوشکاری و اتصال با بالاترین کیفیت ممکن دارند. دشواری‌های موجود در ایجاد اتصال آلیاژهای آلومینیوم، یکی از موانع عمده در استفاده گسترده از این آلیاژها در صنایع مختلف به شمار می‌رود. از این رو، توسعه و ابداع روش‌های نوین جوشکاری برای اتصال این نوع آلیاژها اهمیت فراوانی یافته است [11-13]. در میان این روش‌ها، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (Friction Stir Welding - FSW) به عنوان یکی از روش‌های اتصال مؤثر حالت جامد، در سال 1991 توسط مؤسسه جوشکاری (The Welding Institute - TWI) ابداع شد[14-16]. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (Friction Stir Spot Welding - FSSW) که برای اتصال قطعات فلزی به ویژه آلیاژهای سبک مانند آلومینیوم و مس کاربرد دارد؛ شامل یک ابزار با طراحی خاص که شامل پین و شانه است، به صورت چرخشی در یک نقطه مشخص روی قطعات کار وارد می‌شود و با ایجاد حرارت اصطکاکی و تغییر شکل پلاستیکی مواد، اتصال قوی و بدون ذوب فلز برقرار می‌شود. این روش به دلیل عدم ذوب فلز، مشکلات متالورژیکی مانند ترک خوردگی انجمادی را کاهش داده و با حرارت ورودی کمتر، تنش‌های باقی‌مانده و اعوجاج کمتری ایجاد می‌کند. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای به دلیل دقت بالا و کیفیت اتصال مطلوب، در صنایع حساس مانند هوافضا، خودرو و الکترونیک کاربرد گسترده‌ای دارد [17،18].

در این فرایند، ابزار در یک نقطه دوران می‌کند و حرکت خطی ندارد، که باعث ایجاد حرارت در محل تماس و نرم شدن مواد می‌شود. سپس با اعمال فشار، دو قطعه به هم متصل می‌شوند. کنترل دقیق پارامترهایی مانند سرعت چرخش ابزار، فشار اعمال شده و زمان جوشکاری برای جلوگیری از ذوب بیش از حد یا عدم اتصال کامل ضروری است. پس از پایان جوشکاری، سرد شدن آرام قطعات برای جلوگیری از ترک‌های ناشی از تنش‌های حرارتی اهمیت دارد [19،20]. شکل(1) نموداری شماتیک از فرایند FSSW را نشان می‌دهد که در آن چهار مرحله؛ چرخش ابزار با سرعت دورانی بالا (a)، فرو روی ابزار (b)، اختلاط و اغتشاش مواد (c) و خروج ابزار (d) نشان داده شده است [21].

بهبود خواص مکانیکی، به‌ویژه افزایش استحکام و سختی نواحی جوشکاری، همواره یکی از مهم‌ترین چالش‌های پژوهشگران برای دستیابی به اتصالاتی با کمترین عیوب و بالاترین کیفیت بوده است. بسیاری از محققان با بررسی تأثیرات جداگانه هر پارامتر بر خواص مکانیکی و متالورژیکی، به مطالعه تأثیر همزمان چندین پارامتر به عنوان متغیرهای فرایند FSSW پرداخته‌اند.



شکل 1- طرح‌واره فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (FSSW) [21].

مالافایا و همکاران [22] در مقایسه مقاومت خستگی اتصالات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای و پرچی آلیاژ AA2024 دریافتند که نمونه‌های جوش‌خورده در آزمایش کشش برشی عملکردی مشابه نمونه‌های پرچی داشتند، اما مقاومت خستگی آن‌ها به‌طور قابل توجهی پایین‌تر بود. آن‌ها نتیجه گرفتند که با وجود مزایای فرایند FSSW، طراحی هندسی اتصالات جوشی باید به گونه‌ای صورت گیرد که از تمرکز تنش‌های موضعی جلوگیری کرده و در نتیجه عملکرد خستگی بهبود یابد. لاکشمینارایانان و همکاران [23] پارامترهای بهینه FSSW برای کنترل خواص اتصال فولاد کم‌کربن خودرویی را معرفی کردند. آن‌ها سه پارامتر سرعت دورانی، عمق نفوذ پین و مدت‌زمان مکث را به عنوان عوامل کلیدی شناسایی کردند که مدت زمان مکث، بیشترین تأثیر را بر مقاومت کششی دارد و پس از آن سرعت دورانی و عمق نفوذ اهمیت دارند. مطابق بررسی‌های موبایی و همکاران [24]، اگرچه FSSW توانایی مناسبی در اتصال آلیاژهای آلومینیوم سبک و با استحکام بالا به سایر مواد مانند مس دارد، اما توسعه این فرایند برای مواد با دمای ذوب

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-28]

بالا به دلیل هزینه بالای ابزار و نرخ سایش آن، با چالش‌های قابل توجهی مواجه است. مطالعات مرزوگ و همکاران [25]، نشان داد شکل ابزار، به‌ویژه پین(pawn)، تأثیر قابل‌توجهی بر مقاومت مکانیکی اتصال جوش دارد. این تأثیر ناشی از گرادیان‌های حرارتی و تنش‌های مکانیکی است که ماده در طول فرایند جوشکاری تجربه می‌کند. اهمیت این پدیده‌ها به طور همزمان به ماهیت ماده و انتخاب پارامترهایی مانند هندسه، موقعیت، دوران ابزار، عمق نفوذ و نیروی اعمال شده توسط پین و شانه بستگی دارد. ودیاسگر و همکاران [26]، تأثیر پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای آلیاژهای آلومینیوم غیرهمجنس را بر خواص مکانیکی و متالورژیکی بررسی کردند و گزارش دادند که سرعت دورانی و زمان تماس ابزار، مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر نرخ کرنش، استحکام، ریزدانه شدن ساختار و افزایش سختی نواحی جوش هستند. نتایج بررسی‌های زانگ و همکاران [27]، نشان داد که در FSSW، استحکام اتصال با افزایش سرعت چرخش کاهش می‌یابد، در حالی‌که زمان تماس تأثیر قابل توجهی ندارد. همچنین، استفاده از روش FSSW متحرک، بهبود قابل توجهی در استحکام جوش ایجاد نمی‌کند. لیو و همکاران [28] در تحقیق خود نشان دادند که در FSSW آلومینیوم به مس، پارامترهای جوشکاری مانند عمق نفوذ و وجود لایه میانی مکمل تأثیر قابل توجهی بر کیفیت و خواص مکانیکی اتصال دارند. این پارامترها نقش مهمی در بهبود استحکام و عملکرد مکانیکی اتصال جوش داده شده ایفا می‌کنند. شن و همکاران [29] هم بیان داشتند که استحکام مطلوب در سرعت‌های چرخشی پایین‌تر قابل حصول می‌باشد. تجزیه و تحلیل ریزساختاری انجام شده توسط کوبیت و همکاران [30] نشان داد که مدت زمان جوشکاری و عمق فرورفتن ابزار از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر کیفیت اتصالات FSSW هستند. همچنین، نتایج بیانگر این است که انتخاب نادرست پارامترهای فرایند جوشکاری می‌تواند منجر به ایجاد عیوب مختلف شود. مطابق نتایج توزاکی و همکاران [31]، ریزساختار جوش به طور قابل توجهی وابسته به طول پروب، سرعت چرخشی ابزار و زمان نگهداری ابزار می‌باشد؛ به‌طوری که ضخامت ورق بالایی زیر فرورفتگی شانه در کوتاه‌ترین زمان نگهداری و کمترین سرعت چرخشی با افزایش طول پروب کاهش نشان داد، اما در سایر شرایط جوشکاری تفاوت قابل توجهی مشاهده نشد. در مقابل، اندازه دکمه جوش با افزایش طول پروب، سرعت چرخشی ابزار و زمان نگهداری افزایش یافت. همچنین، استحکام برشی کششی با افزایش طول پروب افزایش یافت، در حالی‌که استحکام کشش متقاطع به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر طول پروب قرار نگرفت. در مطالعه پاساک و همکاران [32]، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق آلومینیوم 5754 با استفاده از ابزارهایی با پین دایره‌ای و مخروطی مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد دمای اوج هنگام جوشکاری با ابزاری با پین دایره‌ای در مقایسه با پین مخروطی بالاتر بود که منجر به ناحیه اغتشاش تبلور مجدد دینامیکی (SZ) بزرگ‌تری با نوک قلاب خم شده به سمت ورق بالایی و دور از سوراخ کلید شد. مطابق بررسی‌های فرسینی و همکاران [33]، نتایج عددی، طول عمر خستگی کوتاه‌تری را نسبت به نمونه‌های آزمایشی در فرایند جوشکاری FSW پیش‌بینی کرده است. این واقعیت به اشاعه اولیه در حالت برشی برای مسافت‌های کوتاه نسبت داده می‌شود که در واقع با میکروسکوپ نوری مشاهده شده است. مطابق مطالعات مکی و همکاران [34]، مشخص شد با تغییر جهت دوران ابزار، فصل مشترک دو ورق نزدیک لبه پین یا هوک (Hook) تغییر شکل و تغییر جهت می‌یابد. همچنین با افزایش زمـان توقف ابزار، عرض منطقه اختلاط و نیروی شکست آزمون برش افزایش می‌یابد. نتایج بررسی‌های صادقی و همکاران [35]، نشان داد استحکام برشی اتصال FSSW دو فلز غیرهم‌جنس آلومینیوم 1050 به مس خالص تجاری، با افزایش سرعت چرخشی و همچنین زمان جوشکاری، افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند. همچنین نتایج حاصل از آزمون ریزسختی نشان از سختی بالای ناحیه اختلاط یافته تا حدود 450 ویکرز می‌باشد که این موضوع ناشی از تشکیل ترکیبات سخت بین فلزی در این ناحیه است؛ به‌طوری‌که پراش پرتو ایکس تشکیل فازهای سخت Al_2Cu و Al_4Cu_9 را تأیید می‌کند.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-28]

نتـایج بررسی‌های رضایی و همکاران [36]، نشان می‌دهد که با افزایش‌سرعت دورانی ابزار، استحکام جوش کاهش می‌یابد. در حالی‌که زمان نگهداری، یک مقدار بهینه را جهت دستیابی به استحکام و سختی مناسب دارا می‌باشد.

از آنجا که تحقیقات محدودی مبنی بر به کارگیری روش FSSW برای آلیاژ آلومینیوم سری 5754 منتشر شده است؛ در این پژوهش، با بکارگیری روش FSSW، تأثیر زمان تماس ابزار با قطعه کار و سرعت دوران ابزار بر ریزساختار، ریزسختی و استحکام برشی جوش حاصل در آلیاژ آلومینیوم 5754 مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

2- مواد و روش تحقیق

نمونه‌های فلزی مورد استفاده برای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (FSSW)، آلیاژ آلومینیوم 5754 است. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی پایه آلیاژ مورد استفاده در جدول‌های(1 و 2) نشان داده شده است. این آلیاژ در خانواده آلیاژهای آلومینیوم-منیزیم (سری 5000 یا 5xxx) قرار دارد. آلیاژ 5754 مقاومت عالی در برابر خوردگی، به ویژه در محیط‌های دریایی و صنعتی آلوده، از خود نشان می‌دهد و قابلیت جوشکاری بسیار خوبی دارد. ورق‌های آلیاژ آلومینیوم با ضخامت1 میلی‌متر و سطح مقطع $100*25\ mm^2$ طبق استاندارد AWS-D17 [37] برش داده شدند. پس از برش‌کاری، عملیات پلیسه‌گیری و اکسیدزدایی به منظور حذف اکسیدها و آلودگی‌ها با استفاده از سنباده انجام شد. در مرحله بعد، نمونه‌ها با استفاده از استون تمیزکاری گردیدند تا هرگونه آلودگی باقی‌مانده حذف شود.

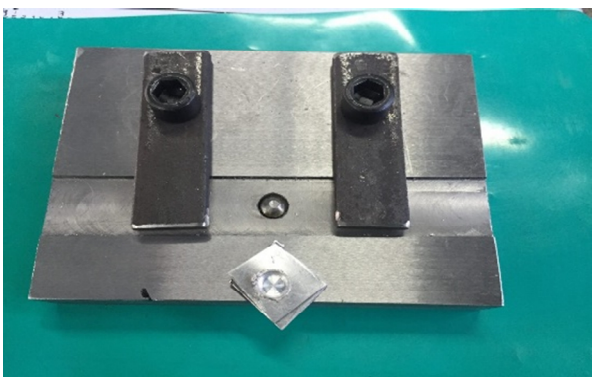
جدول 1- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 5754 مورد استفاده (درصد وزنی)

عنصر	Mg	Mn	Fe	Si	Cr	Al
درصد وزنی	2.740	0.327	0.185	0.080	0.060	96.535

جدول 2- خواص مکانیکی ورقه‌های آلیاژ آلومینیوم 5754

استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی نهائی (MPa)	درصد ازدیاد طول (%)	سختی (VHN)
190	275	11	80

قطعات بر روی نگهدارنده که به همین منظور طراحی و ساخته شده بود، به طور کامل موقعیت‌دهی و گیره‌بندی شدند. شکل(2) نگهدارنده مورد استفاده را نشان می‌دهد. طراحی و ساخت این نگهدارنده براساس ابعاد نمونه آزمایشی کششی-برشی و مطابق با استاندارد انجام شده است. ابزارهای مورد استفاده از جنس فولاد ابزار تندبر (HSS) بودند. تفاوت اصلی ابزارهای مورد استفاده در قیاس با تحقسقات قبلی، استفاده هم‌زمان از دو ابزار در یک مرحله است. شکل این دو ابزار با یکدیگر متفاوت است؛ به‌گونه‌ای که ابزار پایینی دارای پیشانی صاف و ساده بوده، به صورت ثابت روی نگهدارنده قرار می‌گیرد و وظیفه آن تمرکز حرارت ایجادشده توسط ابزار بالایی در ناحیه تماس پیشانی ابزار و قطعه کار است. ابزار بالایی که وظیفه دوران را نیز بر عهده دارد، دارای یک پله با قطر 5 میلی‌متر و طول لبه پله 1/5 میلی‌متر است. قسمت پیشانی بزرگ این ابزار نیز با زاویه‌ای حدود 1 درجه به سمت داخل طراحی شده است تا موجب تجمیع ماده خمیری‌شده در مرکز جوشکاری و جلوگیری از خروج آن به بیرون شود. وظیفه اصلی پله ابزار، اختلاط ماده در حین خمیری شدن است (شکل 3).

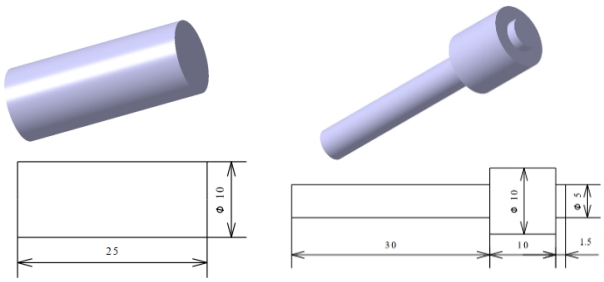


شکل 2- نگهدارنده مورد استفاده در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای

عملیات جوشکاری بر روی دستگاه سوراخ‌کاری رادیال انجام شد. پس از گیره‌بندی نگهدارنده و ثابت نمودن آن بر روی دستگاه، ابزار ثابت پایینی بر روی نگهدارنده گیره‌بندی شد. سپس نمونه‌های برش‌خورده، طبق ابعاد مندرج در استاندارد گیره‌بندی گردیدند. سطح قرارگیری دو ورق بر روی هم

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-28]

$25*25\ mm^2$ تعیین و جوشکاری در مرکز این ناحیه انجام پذیرفت. ابزار بالایی نیز توسط ابزارگیر به‌طور کامل بر روی دستگاه گیره‌بندی شد؛ به‌گونه‌ای که در حین فرایند از حرکت ابزار در راستای محور دستگاه جلوگیری شود. پس از شروع دوران، ابزار به‌صورت آهسته بر روی قطعه حرکت کرد و در موقعیت مماس پیشانی ابزار و قطعه کار، با استفاده از کرونومتر، زمان تماس مماسی ابزار و قطعه کار اندازه‌گیری شد. پس از گذشت مدت زمان معین، ابزار با فشار ثابت حدود 45 کیلوگرم و میزان نفوذ ثابت 1/5 میلی‌متر به سطح قطعه نفوذ داده شد.



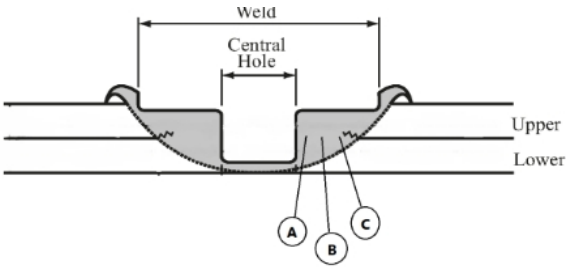
(ب) (الف)

شکل 3- تصویر ابزار دوار بالایی (الف) و ابزار ثابت پایینی (ب) (ابعاد به میلی‌متر می‌باشد)

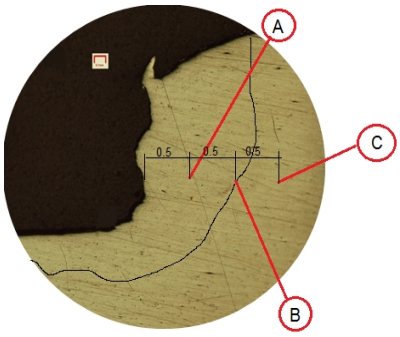
جدول 3- طراحی آزمایش‌ها با توجه به سرعت‌های چرخش مختلف ابزار بالایی و زمان‌های مماسی ابزار

شماره آزمایش	سرعت دورانی (rpm)	زمان تماس (s)
1	1320	40
2	1800	40
3	2500	40
4	1320	60
5	1800	60
6	2500	60
7	1320	80
8	1800	80
9	2500	80

پس از رسیدن به مقدار نفوذ تعیین‌شده، ابزار به سمت بالا کشیده شد و بدین ترتیب عملیات نقطه‌جوش انجام گرفت. در ادامه، با ثابت نگه داشتن پارامترهای شکل ابزار، جنس ابزار، میزان نفوذ، جهت دوران ابزار و فشار اعمالی بر قطعه، پارامترهای متغیر در هر مرحله تغییر داده شده و نتایج ثبت و مورد بررسی قرار گرفت. پس از تغییر سرعت‌های دورانی ابزار بالایی در سه حالت مختلف و همچنین تغییر زمان‌های تماس ابزار در سه بازه زمانی متفاوت، عملیات جوشکاری انجام شد. طراحی آزمایش‌ها و شرایط مربوطه در جدول(3) ارائه شده است. به منظور بررسی تأثیر سرعت چرخش ابزار، زمان مماسی ابزار و به دنبال آن با افزایش دمای ماده و میزان اغتشاش، دانه‌بندی و ریزساختار مناطق کناری جوش توسط میکروسکوپ نوری مورد ارزیابی قرار گرفت. با نمونه‌برداری در راستای عمود بر مقطع جوش، ریزسختی‌سنجی در مناطقی از جوش که در شکل(4) نشان داده شده است، با بار اعمالی 0.1 Kg_f انجام گرفت. برای هر شرایط سه نمونه مورد آزمایش ریزسختی‌سنجی قرار گرفت و میانگین نتایج گزارش گردید.



(الف)

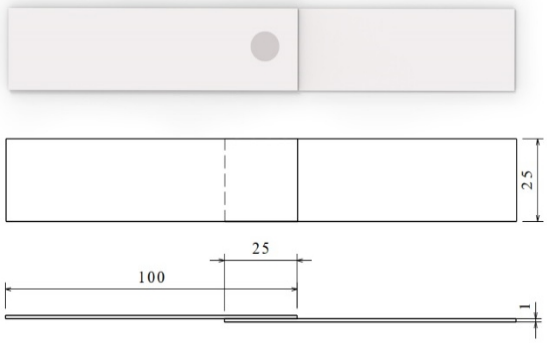


(ب)

شکل 4- طرح‌واره مقطع جوش (الف) و نقاط ریزسختی‌سنجی شده (ب)

نمونه‌های جوشکاری شده مورد استفاده در آزمایش کششی–برشی، مطابق آنچه که در شکل(5) نشان داده شده است مورد ارزیابی مکانیکی با استفاده از دستگاه آزمون کشش مدل SHIMADZU AG-25TB قرار گرفتند. برای هر شرایط سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین نتایج گزارش گردید.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-28]

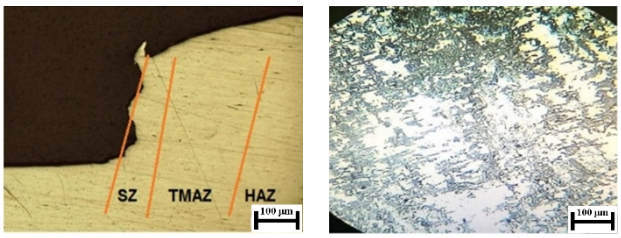


شکل 5- نمونه‌های جوشکاری شده جهت آزمایش کششی - برشی

3- نتایج و بحث

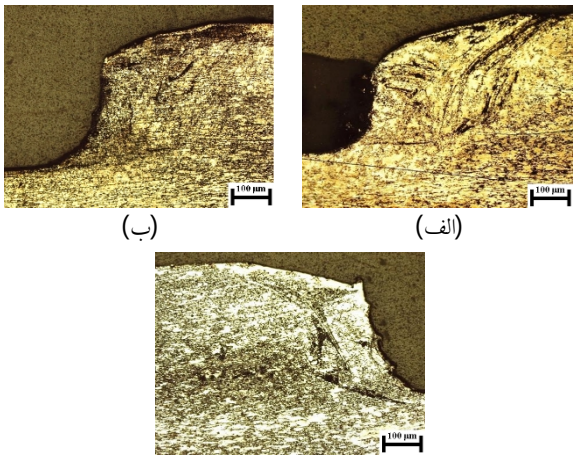
تصاویر ریزساختاری میکروسکوپ نوری از نمونه ماده خام و مقطع حاصل از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (FSSW) بدون عملیات اچ، در شکل(6) ارائه شده است. مطابق شکل (6-الف)، ساختار فلزپایه دارای بافت کشیده‌ای از دانه‌ها و توزیع غیریکنواخت از رسوبات است. همان‌طور که در شکل (6-ب) مشاهده می‌شود، بر اساس تغییرات ریزساختاری ایجاد شده در اثر فرایند FSSW، سه منطقه مجزا به ترتیب از لبه پین تشکیل می‌شوند که به صورت محدوده تقریبی نواحی سه‌گانه در شکل مشخص شده‌اند. همچنین تقسیم‌بندی‌های مشابه نواحی مختلف FSSW، در کارهای دیگران هم مشاهده شده است [39،38].

- منطقه اختلاط (SZ): این ناحیه که نزدیک‌ترین منطقه به لبه پین است، به دلیل اعمال کار مکانیکی شدید در دمای بالا، دانه‌هایی بسیار ریز و هم‌محور دارد که از طریق مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی شکل گرفته‌اند.
- منطقه تحت تأثیر فرایند ترمومکانیکی یا (TMAZ): در این منطقه، دانه‌ها تحت تأثیر تغییر شکل پلاستیک و حرارت قرار گرفته و در جهت کار مکانیکی کشیده شده‌اند. این تغییرات ناشی از دوران سریع پین شیاردار و اصطکاک ابزار جوشکاری با مواد اطراف است.
- منطقه متأثر از حرارت یا (HAZ): دانه‌ها و ذرات در این ناحیه درشت‌تر از منطقه اختلاط بوده و تنها تحت تأثیر حرارت قرار گرفته‌اند بدون اینکه تغییر شکل پلاستیک قابل توجهی داشته باشند.این تقسیم‌بندی نواحی ریزساختاری، نشان‌دهنده تأثیرات مکانیکی و حرارتی متفاوت در طول فرایند FSSW است که بر خواص ریزساختاری و در نهایت خواص مکانیکی اتصال تأثیرگذار می‌باشد. تصویر ماکروسکوپی کنار جوش نمونه با مدت زمان تماس40 ثانیه و سرعت‌های دورانی مختلف ابزار در شکل(7) نشان داده شده است. در شکل(7-الف)، به دلیل پایین بودن سرعت دوران ابزار و دمای اصطکاکی، یکنواختی ساختار مشاهده نمی‌شود؛ اما در شکل (7-ب)، یکنواختی رشد ذرات در منطقه اختلاط تا حدی بهبود یافته است و در شکل(7-پ)، به علت افزایش سرعت دورانی و دمای اصطکاکی، یکنواختی ساختار به صورت کامل‌تری مشاهده می‌شود.



(ب) (الف)

شکل 6- ریزساختار میکروسکوپ نوری از نمونه ماده خام (الف) و مقطع فرایند FSSW بدون عملیات اچ **با محدوده تقریبی نواحی سه‌گانه** (ب)



(ب) (الف)

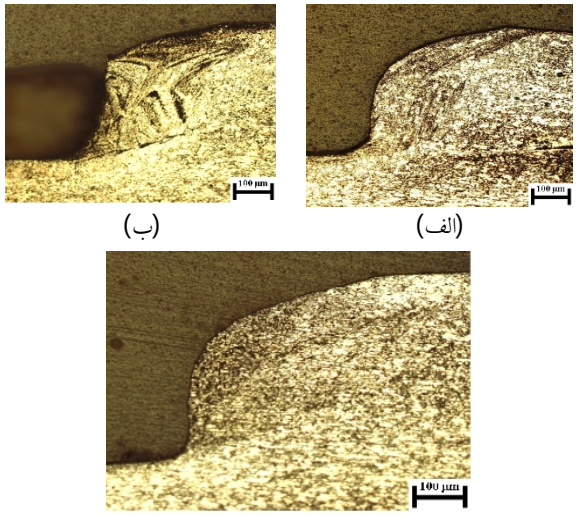
(پ)

شکل 7- تصویر ماکروسکوپی کنار جوش نمونه با مدت زمان تماس 40 ثانیه و سرعت دورانی 1320(الف)، 1800(ب) و 2500(پ)

تصویر ماکروسکوپی کنار جوش نمونه با مدت زمان تماس 60 ثانیه و سرعت‌های دورانی مختلف ابزار در شکل(8) ارائه شده است. در شکل(8-الف)، به دلیل پایین بودن سرعت دوران ابزار و دمای اصطکاکی، توزیع یکنواختی از ذرات مشاهده نمی‌شود؛ در شکل(8-ب)، یکنواختی رشد ذرات در منطقه

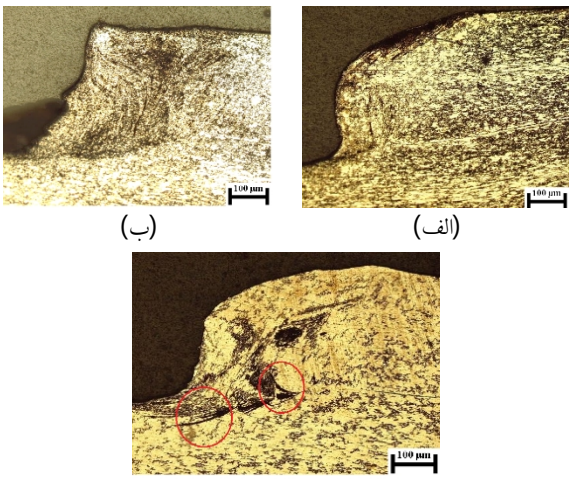
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-28]

اختلاط نسبتاً کامل‌تر است و در شکل(8-پ)، با افزایش سرعت دورانی، یکنواختی ذرات به طور کامل‌تری حاصل شده است.



شکل 8- تصویر ماکروسکوپی کنار جوش نمونه با مدت زمان تماس 60 ثانیه و سرعت دورانی الف- 1320 ب- 1800 پ -2500

تصویر ماکروسکوپی کنار جوش نمونه با مدت زمان تماس 80 ثانیه و سرعت‌های دورانی مختلف ابزار در شکل(9) نشان داده شده است. در شکل(9-الف)، به علت کم بودن سرعت دورانی و افزایش زمان، توزیع یکنواختی از ذرات به خوبی مشاهده می‌شود. در شکل(9-ب)، یکنواختی رشد ذرات در منطقه اختلاط به صورت کامل نمایان است و در شکل(9-پ)، به دلیل افزایش سرعت دورانی و مدت زمان تماس، رشد ترک‌های ریز قابل مشاهده است. به نظر می‌رسد تا سرعت چرخش آستانه مشخصی، کیفیت اتصال جوش بهتر است و هیچ نقص و نواحی با چسبندگی جزیی نشان داده نمی‌شود، اما سرعت بالاتر احتمال ایجاد نقص در ناحیه اختلاط را افزایش می‌دهد. افزایش فاکتورهای سرعت دورانی و مدت زمان تماس منجر به افزایش گرمای اصطکاکی و افزایش دما می‌شود که در نتیجه افزایش سیلان و افزایش حجم مواد خمیری در نواحی نزدیک به فصل مشترک را به دنبال دارد که نتیجه آن افزایش طول ناحیه اتصال است. همچنین با افزایش سرعت دورانی و به تبع آن افزایش دمای منطقه جوش(SZ)، یکنواختی ساختار بیشتر می‌شود؛ اما در سرعت‌های دورانی پایین‌تر، تنها فشردگی ناشی از فشار بیشتر ابزار قابل توجه است. با افزایش مدت زمان تماس قطعه با ابزار و افزایش اصطکاک، دما نیز افزایش یافته و این موضوع نقش مهمی در اختلاط بهتر ساختار ایفا می‌کند. در نهایت، افزایش زمان تماس ابزار با قطعه منجر به افزایش حرارت ورودی و به تبع آن افزایش عرض مناطق SZ و HAZ می‌شود.

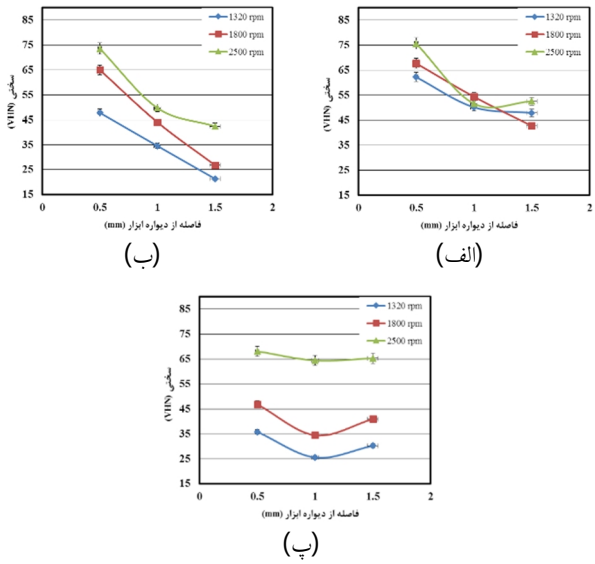


شکل 9- تصویر ماکروسکوپی کنار جوش نمونه با مدت زمان تماس 80 ثانیه و سرعت دورانی الف- 1320، ب-1800 پ-2500

تغییرات سختی نمونه‌ها برحسب فاصله از دیواره ابزار در زمان‌های تماس 40، 60 و 80 ثانیه نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش سرعت دورانی، سختی نمونه‌ها افزایش یافته است. افزایش سرعت دورانی ابزار باعث تولید حرارت بیشتر در ناحیه جوش می‌شود که با ایجاد اختلاط موثرتر، تشکیل ریزساختار جوش یکنواخت‌تر و ریزدانه‌تر را در پی دارد. بررسی محققان دیگر نشان می‌دهد که افزایش سرعت دورانی ابزار موجب افزایش لحظه‌ای دمای منطقه جوش حین انجام فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌شود[40،41]. همچنین افزایش سرعت، موجب تشکیل دانه‌های ریز ناشی از تبلور مجدد و شکستن رسوبات درشت اولیه و ایجاد رسوبات ریز می‌شود. بنابراین، مطابق با رابطه هال-پچ [42-44]، با افزایش سرعت دورانی، افزایش سختی رخ داده است. بررسی نتایج سختی‌سنجی توسط سایر پژوهشگران نشان می‌دهد که با ثابت فرض کردن سایر پارامترهای فرایندی شامل قطر ابزار،

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-28]

ضخامت ورق، زمان نگهداری و عمق نفوذ ابزار، افزایش سرعت دورانی ابزار منجر به افزایش ریزسختی در هر سه ناحیه اصلی جوش می‌شود [36]. همچنین، به واسطه رشد دانه‌ها و وجود رسوبات درشت، با حرکت به سمت نواحی دورتر از دیواره ابزار، مطابق با رابطه هال-پچ، سختی کاهش می‌یابد. بیشترین نتایج ریزسختی در FSSW مربوط به ناحیه همزده یا SZ است. در این ناحیه ماده تحت تأثیر مستقیم ابزار چرخان قرار گرفته و دچار تغییر شکل پلاستیک شدید و تبلور مجدد دینامیکی می‌شود که باعث ریز شدن ساختار دانه‌ها و افزایش قابل توجه سختی می‌گردد. نواحی اطراف TMAZ و HAZ، ریزسختی کمتری نسبت به منطقه دکمه جوش دارند. این رفتار در نتایج تحقیق رضایی و همکاران هم مشاهده شده است [36].



شکل 10- تغییرات سختی نمونه‌ها برحسب فاصله از دیواره ابزار در مدت زمان‌های تماس الف-40 ثانیه، ب-60 ثانیه و پ-80 ثانیه

در مورد تأثیر زمان تماس بر میزان سختی، مشاهده می‌شود که با افزایش زمان تماس، میانگین سختی کاهش می‌یابد. علت کاهش سختی با افزایش زمان تماس، معمولاً به دلیل تغییرات در ریزساختار و رشد دانه‌ها در ناحیه جوش است. افزایش زمان تماس باعث افزایش مقدار حرارت تولید شده توسط اصطکاک و در نتیجه افزایش دمای ناحیه جوش می‌شود. این افزایش دما موجب رشد دانه‌ها در منطقه جوش و حل شدن رسوبات بین‌فلزی می‌شود که به کاهش سختی منجر می‌گردد. همچنین، با افزایش زمان تماس، امکان بازیابی (Recovery) از طریق حل شدن نابجایی‌ها وجود دارد که سختی را کاهش می‌دهد. محققین دیگر کاهش سختی در FSSW را ناشی از رشد دانه و آنیل گزارش کرده‌اند [45]. رگرسیون خطی نتایج ریزسختی نقطه C به‌صورت رابطه (1) ارائه شده است.

$$Hardness\ C\ (VHN) = 0.0207348\ N\ (rpm) + 0.0314109\ T\ (s) \quad (1)$$

آنالیز واریانس داده‌های مربوط به نقطه C بر اساس رابطه (1) در جدول(4) ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، مقدار P برای فاکتور دور (rpm) کمتر از 0/05 و برای فاکتور زمان (s) بیشتر از 0/05 به‌دست آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که از نظر آماری، تنها فاکتور دور با سطح اطمینان بیش از 90% بر مقدار ریزسختی نقطه C تأثیر معنی‌داری دارد، در حالی که فاکتور زمان تأثیر قابل توجهی بر ریزسختی این نقطه ندارد. همچنین، مقبولیت مدل بر اساس مقدار R-Sq(adj) معادل 93/43% ارزیابی شده است که بیانگر تطابق مناسب مدل تحلیل شده با داده‌های تجربی می‌باشد.

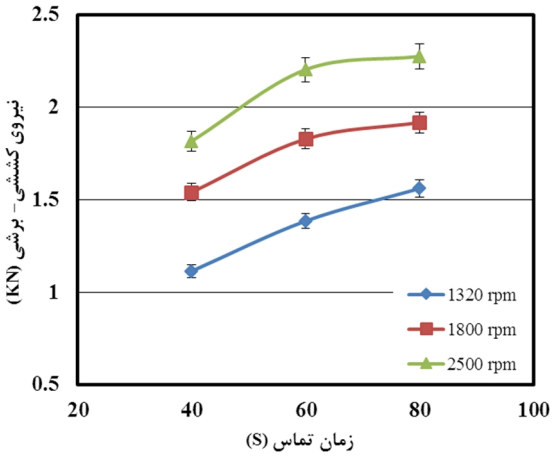
جدول 4- آنالیز واریانس داده‌ها برای ریزسختی نقطه C

منبع	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
رگرسیون	2	15839/5	15839/5	7919/76	65/0183	0/000030
دور(rpm)	1	15835/1	1844/8	1844/85	15/1455	0/005962
زمان(s)	1	4/4	4/4	4/37	0/0359	0/855109
خطاها	7	852/7	852/7	121/81		
مجموع	9	16692/2				
R-Sq(adj) =93/43%		R-Sq =94/89%		S =11/0367		

تأثیر سرعت دوران ابزار و زمان تماس ابزار با قطعه کار بر میزان نیروی کششی- برشی در شکل(11) نشان داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، افزایش سرعت دوران ابزار و افزایش زمان تماس ابزار موجب افزایش دمای حرارتی اصطکاکی در ناحیه جوشکاری می‌گردد. افزایش زمان تماس و افزایش سرعت دوران، باعث افزایش حرارت حاصل از اصطکاک می‌شود که موجب اختلاط بیشتر مواد در منطقه جوش می‌گردد. حرارت بیشتر باعث افزایش حجم منطقه تحت تأثیر حرارت و ذوب موضعی فلز می‌شود که سطح اتصال در فصل مشترک را افزایش می‌دهد. افزایش سطح اتصال و

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-28]

ایجاد قفل مکانیکی بهتر بین مواد در ناحیه جوش باعث افزایش نیروی مقاومت و در نتیجه نیروی کششی برشی می‌شود. همچنین با افزایش عرض و مساحت منطقه اختلاط، سطح مؤثر مقاومت‌کننده در برابر نیروهای کششی- برشی افزایش یافته و در نتیجه نیروی مورد نیاز برای شکست نیز افزایش می‌یابد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد [45،41،40،36]، ریز شدن دانه‌ها و شکستگی رسوبات درشت اولیه، تحت تأثیر افزایش سرعت دوران و افزایش مدت زمان تماس، از سایر عوامل افزایش نیروی کششی- برشی هستند.



شکل 11- تغییرات نیروی برشی نمونه‌ها برحسب مدت زمان‌های تماس

جدول 5- آنالیز واریانس داده‌ها برای استحکام برشی

منبع	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
رگرسیون	2	28/1513	28/1513	14/0757	1862/26	0/0000000
دور(rpm)	1	26/5744	0/4442	0/4442	58/77	0/0001195
زمان(s)	1	1/5769	1/5769	1/5769	208/63	0/0000018
خطاها	7	0/0529	0/0529	0/0076		
مجموع	9	28/2042				
	R-Sq(adj) =99/76%		R-Sq =99/81%		S =0/0869390	

رگرسیون خطی نتایج نیروی برشی به‌صورت رابطه (2) ارائه شده است.

$$Shear\ Force\ (KN) = 0.0100121\ T\ (s) + 0.000606208\ N\ (rpm) \quad (2)$$

آنالیز واریانس داده‌ها براساس رابطه (2) در جدول(5) آورده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود مقدار P برای فاکتورهای زمان (s) و دور (rpm) کوچک‌تر از 0/05 به‌دست آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که از نظر آماری، فاکتورها با سطح اطمینان بیشتر از 95% بر مقدار نیروی کششی- برشی مؤثر هستند. همچنین، مقبولیت مدل براساس مقدار R-Sq(adj) معادل 99/76% ارزیابی شده است که بیانگر تطابق مناسب مدل تحلیل شده با داده‌های تجربی می‌باشد.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر سرعت دوران ابزار و زمان تماس ابزار با قطعه کار در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم سری 5754 مورد بررسی قرار گرفته است که نتـایج زیـر حاصل شده است؛

- در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، سرعت دوران ابزار و زمان تماس ابزار با قطعه کار دو پارامتر کلیدی و تأثیرگذار به شمار می‌روند، زیرا این عوامل نقش مهمی در ایجاد اغتشاش مؤثر و افزایش دمای اصطکاکی دارند. افزایش سرعت دوران ابزار موجب تولید حرارت بیشتر از طریق اصطکاک شده و به اختلاط بهتر مواد در ناحیه جوش کمک می‌کند، در حالی‌که زمان تماس کافی، امکان انتقال حرارت و رشد بیشتر دانه‌ها و رسوب‌ها را فراهم می‌آورد.
- با افزایش سرعت دورانی ابزار از (rpm) 1820 تا 2500 و به تبع آن افزایش دمای منطقه جوش(SZ)، یکنواختی ساختار بیشتر می‌شود. همچنین افزایش زمان تماس ابزار با قطعه از 40 تا 80 ثانیه، منجر به افزایش حرارت ورودی و به تبع آن افزایش عرض مناطق SZ و HAZ می‌شود.
- به نظر می‌رسد تا سرعت چرخش آستانه مشخصی، کیفیت اتصال جوش بهتر است و هیچ نقص و نواحی با چسبندگی جزئی نشان داده نمی‌شود، اما سرعت بالاتر احتمال ایجاد نقص در ناحیه اختلاط را افزایش می‌دهد.
- افزایش سرعت دورانی ابزار از (rpm) 1820 تا 2500 و افزایش میزان اختلاط در ناحیه متاثر از حرارت با کاهش اندازه دانه‌ها و ایجاد رسوبات ریز، افزایش سختی را در پی داشته است. همچنین با افزایش زمان تماس، به واسطه رشد دانه‌ها و بهم پیوستن رسوب‌ها، میانگین سختی کاهش یافته است.
- افزایش سرعت دوران ابزار و افزایش زمان تماس ابزار، با افـزایش عرض و مسـاحت منطقه اختـلاط و در نتیجه افزایش

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-28]

سطح مؤثر مقاومت‌کننده در برابر نیروهای کششی- برشی، بهبود نیروی کششی- برشی به میزان حدود 105% را در پی داشته است.

منابع

1- Threadgill, P. L., Leonard, A. J., Shercliff, H. R., & Withers, P. J. (2009). Friction stir welding of aluminium alloys. *International Materials Reviews*, *54*(2): 49-93. https://doi.org/10.1179/174328009X411136

2- Rakshith, M., & Seenuvasaperumal, P. (2021). Review on the effect of different processing techniques on the microstructure and mechanical behaviour of AZ31 Magnesium alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, *9*(5): 1692-1714. https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.03.019

3- Yang, S. H. E. N. (2006). Evaluation of microstructure and mechanical property of FSW welded MB3 magnesium alloy. *Journal of Iron and Steel Research, International*, *13*(4): 75-78. https://doi.org/10.1016/S1006-706X(06)60082-4

4- Liu, Z., Fan, Z., Liu, L., Miao, S., Lin, Z., Wang, C., ... & Dong, C. (2023). Refill friction stir spot welding of AZ31 magnesium alloy sheets: Metallurgical features, microstructure, texture and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*, *23*: 3337-3350. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.151

5- Hsu, H. H., & Hwang, Y. M. (2007). A study on friction stir process of magnesium alloy AZ31 sheet. *Key Engineering Materials*, *340*: 1449-1454. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.340-341.1449

6- Ahmed, M. M., El-Sayed Seleman, M. M., Sobih, A. M. E. S., Bakkar, A., Albaijan, I., Touileb, K., & Abd El-Aty, A. (2023). Friction stir-spot welding of AA5052-H32 alloy sheets: effects of dwell time on mechanical properties and microstructural evolution. *Materials*, *16*(7): 2818. https://doi.org/10.3390/ma16072818

7- Fu, B., Shen, J., Suhuddin, U. F., Pereira, A. A., Maawad, E., dos Santos, J. F., ... & Rethmeier, M. (2021). Revealing joining mechanism in refill friction stir spot welding of AZ31 magnesium alloy to galvanized DP600 steel. *Materials & Design*, *209*: 109997. 10.1016/j.matdes.2021.109997

8- Chen, Y. C., & Nakata, K. (2009). Microstructural characterization and mechanical properties in friction stir welding of aluminum and titanium dissimilar alloys. *Materials & Design*, *30*(3): 469-474. 10.1016/j.matdes.2008.06.008

9- Nirmal, K., & Jagadesh, T. (2021). Numerical simulations of friction stir welding of dual phase titanium alloy for aerospace applications. *Materials Today: Proceedings*, *46*: 4702-4708. 10.1016/j.matpr.2020.10.300

10- Meikeerthy, S., Ethiraj, N., Neme, I., & Masi, C. (2023). Evaluation of pure titanium welded joints produced by underwater friction stir welding. *Advances in Materials Science and Engineering*, *2023*(1): 2092339. https://doi.org/10.1155/2023/2092339

11- Çam, G., Javaheri, V., & Heidarzadeh, A. (2023). Advances in FSW and FSSW of dissimilar Al-alloy plates. *Journal of Adhesion Science and Technology*, *37*(2): 162-194. https://doi.org/10.1080/01694243.2022.2028073

12Heidarzadeh, A., Mironov, S., Kaibyshev, R., Çam, G., Simar, A., Gerlich, A., ... & Withers, P. J. (2021). Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution. *Progress in Materials Science*, *117*: 100752. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100752

13- Kashaev, N., Ventzke, V., & Çam, G. (2018). Prospects of laser beam welding and friction stir welding processes for aluminum airframe structural applications. *Journal of Manufacturing Processes*, *36*: 571-600. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.10.005

14- Dawes, C. J. (1995). Friction Stir Joining of Aluminium Alloy. *Welding Jounal*, *36*. https://cir.nii.ac.jp/crid/1571135649239052928

15-Thomas W, Nicholas E, Needham J, Murch M, Temple-Smith P, Dawes C. Friction welding, us patent 5,460,317. https://patents.google.com/patent/US5460317A/en

16- Hajiha, M. R., Farzadi, A., Samadani Agdam, S. A., Shabanzadeh, A., & Ramezani, S. (2024). Microstructural and mechanical properties of dissimilar joining of AA5052 and AA6061 by friction stir welding. *Journal of Welding Science and Technology of Iran*, *9*(2): 39-51. http://jwsti.iut.ac.ir/article-۴۲۴-۱-fa.html

17- Prangnell, P. B., & Bakavos, D. (2010, April). Novel approaches to friction spot welding thin aluminium automotive sheet. In *Materials Science Forum* (Vol. 638, pp. 1237-1242). Trans Tech Publications Ltd. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.1237

18-Zarei O, Mosavizade M, Zarghani F, Zarei H. (2019). Protrusion friction stir spot welding: the microstructure and mechanical properties of Al 6061 alloy. *Journal of New Materials, 10(36)*: 51-68. 20.1001.1.22285946.1398.9.36.4.8 [In Persian]

19-Dorougar J, Seyedhossein Seyedkashi M, Sajed M. (2022). Experimental study of friction stir spot welding process of non-alloy aluminum sheet with fixed shoulder. *Karafan Journal. 59:* 141-61. 10.48301/kssa.2021.283937.1504 [In Persian].

20-Afshari D, Modaresinia H, Karimi Ivanaki M, Entezarian M. (2024). Experimental investigation on mechanical properties affected by dissimilar friction stir spot welding of aluminum 6061-T6 alloy to copper. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 10(6):* 53-64. 10.22034/ijme.2023.413891.1824 [In Persian].

21- Shen, Z., Ding, Y., & Gerlich, A. P. (2020). Advances in friction stir spot welding. *Critical Reviews*

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-28]

32- Pathak, N., Bandyopadhyay, K., Sarangi, M., & Panda, S. K. (2013). Microstructure and mechanical performance of friction stir spot-welded aluminum-5754 sheets. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *22*(1): 131-144. https://doi.org/10.1007/s11665-012-0244-x

33-Fersini, D., & Pirondi, A. (2007). Fatigue behaviour of Al2024-T3 friction stir welded lap joints. *Engineering fracture mechanics*, *74*(4): 468-480. http://doi.org//10.1016/j.engfracmech.2006.07.010.

34-Maki, A., Safarkhanian, MA., Kheirandish, S., Goodarzi, M. (2012). Investigation of the Effect of Rotation Direction and Dwell Time in Friction Stir Spot Welding (FSSW) on the Geometry and Strength of 2024-T3 Aluminum Sheet Welds, Novel Methods in Materials Engineering. 6(1): 1-10. https://civilica.com/doc/1407455

35-Sadeghi, E., Shahbazi Karami, J. Investigation of mechanical properties of aluminum to copper joint by friction stir spot welding. In: Conference on Novel Findings in Aerospace and Related Sciences; Tehran, Iran. Tehran: Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran; 2015. https://civilica.com/doc/441220

36- Rezaei Ashtiani, H., & Shafiee, M. (2018). The Mechanical Properties Evaluation of the Welded Sheets of AA 3105 Aluminum Alloy Using Friction Stir Spot Welding (FSSW). *Journal of Welding Science and Technology of Iran*, *4*(1): 77-87. http://jwsti.iut.ac.ir/article-1-186-fa.html

37-American Welding Society. AWS D17.1: Specification for Fusion Welding for Aerospace Applications. 3rd ed. Miami, FL: American Welding Society; 2010. https://pubs.aws.org/Download_PDFS/AWS_D17_1M_D17_1_2017_AMD2_PV.pdf?srsltid=AfmBOopNbFmNiyQbTeLiP8oDJZO2v3I3J_XXpf1gugi6XsuY7UvinVuu

38- Derogar, J., Seyedkashi, S. M. H., & Sajed, M. (2022). Experimental study of friction stir spot welding of a non-alloyed aluminium sheet with stationary shoulder. *Karafan Journal*, *19*(3), 141-161. https://karafan.tvu.ac.ir/article_137135.html

39- Reynolds, A. P., & Tang, W. (2001). Alloy, tool geometry, and process parameter effects on friction stir weld energies and resultant FSW joint properties. In *Proceedings of Symposium on Friction Stir Welding and Processing* (pp. 15-23).

40- Arul, S. G., Pan, T., Lin, P. C., Pan, J., Feng, Z., & Santella, M. L. (2005). *Microstructures and failure mechanisms of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 5754 sheets* (No. 2005-01-1256). SAE Technical Paper. https://doi.org/10.4271/2005-01-1256

41- Moradi, M. M., Jamshidi Aval, H., & Jamaati, R. (2016). Experimental investigation on the effect of friction stir welding process parameters in dissimilar joining of AA2024-T351 and AA6061-T6 aluminum *in Solid State and Materials Sciences*, *45*(6): 457-534. https://doi.org/10.1080/10408436.2019.1671799

22- Malafaia, A. M. D. S., Milan, M. T., Oliveira, M. F. D., & Spinelli, D. (2010). Fatigue behavior of friction stir spot welding and riveted joints in an Al alloy. *Procedia Engineering*, *2*(1): 1815-1821. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.03.195

23- Lakshminarayanan, A. K., Annamalai, V. E., & Elangovan, K. (2015). Identification of optimum friction stir spot welding process parameters controlling the properties of low carbon automotive steel joints. *Journal of Materials Research and Technology*, *4*(3): 262-272. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.01.001

24- Mubiayi, M. P., Akinlabi, E. T., & Makhatha, M. E. (2018). Current state of friction stir spot welding between aluminium and copper. *Materials Today: Proceedings*, *5*(9): 18633-18640. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.208

25- Merzoug, M., Mazari, M., Berrahal, L., & Imad, A. (2010). Parametric studies of the process of friction spot stir welding of aluminium 6060-T5 alloys. *Materials & Design*, *31*(6): 3023-3028. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.12.029Get rights and content

26-Vidyasagar, S., Balaji, A., Sharif, SM., Uthayakumar, R. (2021). Influence of multi-pass friction stir spot welding on microstructure and mechanical properties of dissimilar aluminum alloy joints. *Journal of Materials Research and Technology*. *10(2):* 449-59. doi:10.1016/j.jalmes.2023.100010

27- Zhang, Z., Yang, X., Zhang, J., Zhou, G., Xu, X., & Zou, B. (2011). Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy. *Materials & Design*, *32*(8-9): 4461-4470. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.058

28- Liu, H., Ma, L., Gong, P., Dong, J., & Yue, Y. (2023). Friction stir spot welding of Al–Cu with different Zn foils. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, *76*(4): 979-988. https://doi.org/10.1007/s12666-022-02792-2

29- Shen, Z., Yang, X., Zhang, Z., Cui, L., & Li, T. (2013). Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints. *Materials & design*, *44*: 476-486. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.026

30- Kubit, A., Bucior, M., Wydrzyński, D., Trzepieciński, T., & Pytel, M. (2018). Failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium alloy single-lap joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *94*(9): 4479-4491. https://doi.org/10.1007/s00170-017-1176-2

31- Tozaki, Y., Uematsu, Y., & Tokaji, K. (2007). Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *47*(15), 2230-2236.https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.07.005

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-28]

44- Park, S. H. C., Sato, Y. S., & Kokawa, H. (2003). Microstructural evolution and its effect on Hall-Petch relationship in friction stir welding of thixomolded Mg alloy AZ91D. *Journal of materials science*, *38*(21): 4379-4383. https://doi.org/10.1023/A:1026351619636
45- Vakili, A. M., & Shirazi, A. (2021). Effect of Speed and Number of Pass in Friction Stir Welding on the Mechanical and corrosion behavior of Commercial Pure Copper. https://www.sid.ir/paper/1069378/en
alloys. *Modares Mechanical Engineering*, *16*(9), 394-402. http://mme.modares.ac.ir/article-15-6239-en.html
42-Dieter, GE and D. Bacon. 1976. Mechanical metallurgy. New York: McGraw-hill.43- Lehto, P., Remes, H., Saukkonen, T., Hänninen, H., & Romanoff, J. (2014). Influence of grain size distribution on the Hall–Petch relationship of welded structural steel. *Materials Science and Engineering: A*, *592*: 28-39. https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.10.094

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-28]