



بهینه‌سازی پارامترهای فرایند ساخت افزایشی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای بهبود خواص مکانیکی و کارایی آن

علی امامی^۱، مجید الیاسی^{۱*}، محمد جواد میرنیا^۱، مازیار رمضانی^۲

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فلیندرز، استرالیا

* ایمیل نویسنده مسئول: elyasi@nit.ac.ir

چکیده

فرایند تولید افزودنی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSAM) یک روش حالت جامد برای ساخت لایه‌ای فلزات است که با استفاده از ابزار دوار، لایه‌های فلزی را بدون ذوب کامل به هم متصل می‌کند و در نتیجه از مشکلات روش‌های ذوبی مانند تخلخل و ترک انجمادی جلوگیری می‌کند. در این مطالعه، بهینه‌سازی پارامترهای FSAM برای بهبود استحکام کششی اتصال آلومینیوم ۱۰۵۰ (ورق پایینی) و ۳۱۰۵ (ورق بالایی) بررسی شد. سه پارامتر کلیدی شامل سرعت چرخشی ابزار، سرعت پیشروی، و هندسه ابزار به عنوان متغیرهای تاثیرگذار انتخاب شدند. طراحی آزمایش‌ها براساس روش تاقگوچی (L9) انجام و تحلیل داده‌ها با استفاده از نسبت سیگنال به نویز — S/N حالت بیشینه کردن صورت گرفت. نتایج نشان داد که ترکیب بهینه پارامترها منجر به بیشینه شدن استحکام کششی نمونه‌ها شد و تاثیر هر پارامتر بر کیفیت اتصال با تحلیل اثرات اصلی مشخص گردید. بیشینه مقدار تنش کششی مشاهده شده ۱۶۴.۱۱ MPa بود و میانگین تجربی نمونه‌ها برابر ۱۵۱.۱۴ ± ۷.۹۴ MPa ثبت شد. تحلیل نشان داد که سرعت پیشروی بیشترین تاثیر را بر استحکام کششی دارد، در حالی که سرعت چرخشی و هندسه ابزار نیز نقش قابل توجهی ایفا می‌کنند. این مطالعه نشان می‌دهد که انتخاب بهینه پارامترهای FSAM می‌تواند به شکل موثری خواص مکانیکی قطعات تولیدشده را بهبود بخشد و راهنمایی علمی برای طراحی پارامترهای عملیاتی ارائه می‌کند.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۶ مهر ۱۴۰۴

پذیرش: ۱۹ اردیبهشت ۱۴۰۵

کلیدواژگان:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

سرعت دورانی

سرعت پیشروی

هندسه ابزار

تست کشش

Optimization of friction stir additive manufacturing (FSAM) process parameters to improve Its mechanical properties and performance

Ali Emami¹, Majid Elyasi^{1*}, Mohammad Javad Mirnia¹, Maziar Ramezani²

1- Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, Flinders University, Australia

* Corresponding Author's Email: elyasi@nit.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 28 September 2025

Accepted: 9 May 2026

Keywords:

FSAM

Rotational Speed

Feed Rate

Tool Geometry

Tensile Strength

Abstract

The Friction Stir Additive Manufacturing (FSAM) process is a solid-state method for layer-by-layer metal fabrication, in which metallic layers are joined using a rotating tool without complete melting, thereby avoiding defects associated with fusion-based methods such as porosity and solidification cracks. In this study, the optimization of FSAM parameters was investigated to improve the tensile strength of the joint between aluminum 1050 (lower sheet) and 3105 (upper sheet). Three key parameters tool rotational speed, traverse speed, and tool geometry were selected as influential variables. The experimental design was conducted based on the Taguchi method (L9), and data analysis was performed using the signal-to-noise (S/N) ratio in the "larger-is-better" mode. The results indicated that the optimal combination of parameters led to the maximum tensile strength of the specimens, and the effect of each parameter on joint quality was determined through main effects analysis. The maximum tensile stress observed was 164.11 MPa, and the experimental mean of the specimens was 151.14 ± 7.94 MPa. The analysis showed that traverse speed had the greatest influence on tensile strength, while rotational speed and tool geometry also played significant roles. This study demonstrates that optimal selection of FSAM parameters can effectively enhance the mechanical properties of fabricated components and provides scientific guidance for designing operational parameters.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Emami A, Elyasi M, Mirnia MJ, Ramezani M. Optimization of friction stir additive manufacturing (FSAM) process parameters to improve Its mechanical properties and performance. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Dec 22;12(10):69-85. doi: 10.22034/ijme.2026.549788.2134 [In Persian]

۱- مقدمه

جوشکاری یکی از روش‌های قدیمی و مهم صنعتی برای اتصال دائمی دو قطعه فلزی یا غیرفلزی است. این فرایند بسته به نوع مواد و شرایط اجرا، انواع مختلفی دارد و شامل جوشکاری ذوبی و غیرذوبی می‌شود. در جوشکاری ذوبی، اتصال با ایجاد مذاب و درهم‌تنیدگی اتم‌ها و مولکول‌ها انجام می‌شود، در حالی که جوشکاری غیرذوبی یا حالت جامد بدون ذوب فلز پایه و اغلب بدون ماده پرکننده صورت می‌گیرد [۱]. جوشکاری اصطکاکی یکی از مهم‌ترین روش‌های حالت جامد است که شامل سه نوع اصلی است: دورانی، غیر دورانی و اغتشاشی [۲]. در جوشکاری اصطکاکی دورانی، یک قطعه در حال چرخش با قطعه ثابت تماس پیدا می‌کند و با حرارت و فشار ایجاد شده اتصال برقرار می‌شود. جوشکاری غیر دورانی از حرکات خطی یا متناوب برای اتصال استفاده می‌کند [۳]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی که در سال ۱۹۹۳ معرفی شد، با ابزار غیرمصرفی دورانی و ایجاد اختلاط مکانیکی در فصل مشترک صفحات، اتصالات باکیفیت و حالت جامد ایجاد می‌کند [۴]. این روش‌ها مزایایی چون استحکام بالا، ریزدانه شدن منطقه جوش، مقاومت خستگی مناسب و تغییر شکل پلاستیک شدید در دمای بالا را فراهم می‌کنند و به دلیل عدم ذوب مواد، مشکلات رایج جوشکاری ذوبی را کاهش می‌دهند. هندسه ابزار و پارامترهای حرارتی-مکانیکی نقش مهمی در کیفیت نهایی اتصال دارند.

ترکیب فناوری تولید افزایشی با جوشکاری و پردازش اصطکاکی منجر به شکل‌گیری فناوری نوین تولید افزایشی اصطکاکی اغتشاشی شده است [۵، ۶]. در این روش، قطعات سه‌بعدی با افزودن لایه به لایه مواد ساخته می‌شوند و اصول آن مبتنی بر جوشکاری اصطکاکی^۱ و پردازش اصطکاکی^۲ است [۷، ۸]. در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ابزار چرخشی شامل شانه و پین، با حرکت در امتداد خط اتصال دو صفحه فلزی، موجب نرم‌شدن و انتقال پلاستیک مواد می‌شود و اتصال کامل ایجاد می‌گردد. مزیت اصلی این روش نسبت به فرایندهای ذوبی، ورودی گرمای پایین و ایجاد دانه‌های ریزتر با خواص مکانیکی بهتر است [۹، ۱۰]. پردازش اصطکاکی برای بهینه‌سازی ریزساختار و خواص مکانیکی توسعه یافته و با کنترل پارامترهای فرایند، امکان دستیابی به ریزساختارهای یکنواخت و ویژگی‌هایی مانند سوپر پلاستیسیته و افزایش نرخ کرنش را فراهم می‌کند [۱۱].

در سال‌های اخیر، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به‌عنوان یک فرایند حالت جامد، توجه گسترده‌ای در اتصال آلیاژهای غیرهمجنس، به‌ویژه آلومینیوم به مس و همچنین آلیاژهای سری ۵۰۰۰ و ۶۰۰۰ آلومینیوم، جلب کرده است. پژوهش‌های تجربی متعدد نشان داده‌اند که خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصال در این فرایند، به شدت تحت تأثیر پارامترهای کلیدی نظیر سرعت چرخش ابزار، سرعت پیشروی، هندسه پین و همچنین استفاده از ذرات تقویت‌کننده مانند آلومینا قرار دارد. برخی از این مطالعات، ارتباط مستقیم ریزساختار مناطق مختلف جوش (مانند ناحیه اغتشاش یافته و ناحیه متأثر از حرارت) را با سختی و مقاومت به سایش نشان داده‌اند. همچنین، بهینه‌سازی پارامترها با روش‌های آماری مانند روش سطح پاسخ، امکان دستیابی به حداکثر استحکام کششی و بهبود کارایی اتصال را فراهم کرده است. با وجود این پیشرفت‌ها، هنوز نیاز به بررسی سیستماتیک تأثیر همزمان پارامترهای فرایند بر خواص مکانیکی و ارائه مدلی جامع برای پیش‌بینی عملکرد اتصال در شرایط مختلف احساس می‌شود [۱۲-۱۷].

رودگری و همکاران [۱۸] گزارش دادند که در جوش‌هایی که با سرعت‌های پیشروی ۷۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده‌اند، ناحیه بین‌سطحی به‌صورت پراکنده تشکیل شده است. دلیل این موضوع، افزایش نرخ کرنش در ناحیه بین سطحی با بالارفتن سرعت پیشروی است که این افزایش نرخ کرنش به شکستن لایه اکسید و در نتیجه، تسهیل اختلاط مواد در این ناحیه کمک می‌کند. در تمامی نمونه‌های بررسی شده، دو ناحیه ریزساختاری مشاهده شد: یکی ناحیه فریت - پرلیت و دیگری ناحیه کاملاً فریتی. همچنین، آن‌ها گزارش کردند که در نمونه‌ای با سرعت پیشروی ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه، دانه‌هایی کشیده و جهت‌دار شکل گرفته‌اند. سربوآستوا و راتهی [۱۹] با بهره‌گیری از روشی نوآورانه، کامپوزیت Al5059-SiC را به‌وسیله فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، تولید کردند. در این مطالعه از صفحات آلومینیومی Al5059 با ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده شد که بر روی آن‌ها سوراخ‌هایی با فاصله ۱ میلی‌متر ایجاد و با پودر سیلیسوم کاربید^۳ پر شده بود. سپس عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، برای ساخت یک سازه‌ی شش‌لایه‌ای انجام شد. نتایج نشان داد که ذرات پودر سیلیسوم کاربید به‌خوبی در ناحیه همزن^۴ توزیع شده‌اند. اندازه‌ی دانه‌ها در ناحیه همزن نسبت به نواحی

¹ Friction Stir Welding (FSW)² Friction Stir Processing (FSP)³ Silicon Carbide⁴ Nugget Zone (NZ)

کار مکانیکی^۱ و نواحی حرارتی^۲ کوچک‌تر بود که این امر به خاصیت غیر قابل عملیات حرارتی بودن Al5059 نسبت داده شد. همچنین مشخص شد که ذرات پودرسلیسوم کاربرد نقش بازدارنده‌ی رشد دانه را ایفا کرده و باعث ریزدانه‌سازی می‌شوند. تاوو و همکاران [۲۰] گزارش دادند که آلومینیوم به دلیل دمای پایین تبخیر و واکنش‌پذیری بالا با اکسیژن، مشکلات زیادی در فرایندهای تولید افزودنی مبتنی بر ذوب ایجاد می‌کند. با این حال، به عنوان یک فناوری حالت جامد، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی قادر است از ذوب و انجماد مواد جلوگیری کرده و این نقص‌ها را برطرف کند. آن‌ها ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ ۲۰۶۰ آلومینیوم - لیتیوم را که با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تولید شده، در شرایط پارامترهای مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد که بهترین پارامتر ترکیبی شامل سرعت چرخشی ۱۶۰۰ دور/دقیقه، سرعت پیشروی ۳۰۰ میلی‌متر/دقیقه و نرخ اسپلیس ۸۰٪ است. به دلیل تبلور مجدد دینامیک ناشی از تغییر شکل پلاستیک و ورودی گرما، دانه‌های ریز و تقریباً کروی با اندازه ۲ تا ۵ میکرومتر در ناحیه همزن تشکیل شده و بیشینه سختی میکرو به HV ۱۳۵ رسید. پری و همکاران [۲۱] لایه‌ای به ضخامت ۱/۶۵ میلی‌متر از آلیاژ AA2024 را بر روی زیرلایه‌ای از AA6061 با ضخامت ۶/۳۵ میلی‌متر نشاندهند. تصاویر میکروسکوپی نشان داد که سطح لایه‌ی نشانی‌شده دارای ظاهری شبیه به پوست پیاز است. ناحیه‌ی تماس در سمت فعال (AS) شامل شیارها و زائده‌های ریز بود، در حالی که در سمت غیرفعال^۳، سطحی با شیب یکنواخت مشاهده شد. هر دو سطح نشاندهنده^۴ و زیرلایه، به دلیل تبلور مجدد دینامیکی، اصلاح چشم‌گیری در اندازه دانه‌ها نشان دادند. ریزساختار در امتداد فصل مشترک AA2024 کاملاً تبلور یافته بود، اما در مورد AA6061 تنها تبلور جزئی مشاهده شد. نواحی دورتر از خط مرکزی نشاندهنده، به دلیل کرنش کمتر، میزان تبلور کمتری داشتند. دیلیپ و همکاران [۲۲] از روش نشاندهنده اصطکاکی برای ساخت ساختاری چندلایه از آلیاژ آلومینیوم AA2014 استفاده کردند. در این پژوهش، میله‌ی مصرفی از آلیاژ T6-2014 و زیرلایه از صفحات Al-Mg آلیاژ AA5083 انتخاب شد. پارامترهای فرایند شامل سرعت چرخشی ۸۰۰ دور در دقیقه، سرعت پیشروی ۱ میلی‌متر بر ثانیه و فشار اعمالی ۲۵ مگاپاسکال بودند. بررسی‌های میکروسکوپی نوری نشان دادند که دانه‌هایی ریز و هم‌محور با اندازه‌ی میانگین حدود ۳ میکرون در ساختار تشکیل شده‌اند. در طول فرایند، دمای زیرلایه به ۴۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد رسید که منجر به پدیده‌ی افزایش سن خفیف شد. به دلیل پلاستیکی شدن ماده، چگالی نابجایی‌ها افزایش یافت؛ بنابراین، بهبود عملیات حرارتی برای جلوگیری از رشد غیرطبیعی دانه‌ها ضروری ارزیابی شد.

استحکام ماده به توانایی آن در مقاومت در برابر تغییر شکل بستگی دارد. عواملی مانند مرزدانه‌ها، حرکت نابجایی‌ها و وجود رسوبات تقویتی، نقش مهمی در تعیین عملکرد سازه‌ای اجزایی دارند که با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تولید می‌شوند. همان‌طور که در بخش پیشین مطرح شد، این اجزا دارای ریزساختاری بسیار ریزدانه و هم‌راستا هستند که حاصل تبلور مجدد دینامیکی پیوسته است. این فرایند موجب تغییرات قابل توجهی در خواص مکانیکی قطعه می‌شود. عامل اصلی افزایش استحکام در محصولات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، رابطه هال - پچ است. پژوهشگران متعددی عملکرد سازه‌ای این اجزا را مورد بررسی قرار داده‌اند و بهبود خواص مکانیکی آن‌ها را گزارش کرده‌اند [۲۳-۳۰].

پالانیول و همکاران [۲۳] دریافتند که سختی نمونه‌ها پس از پیرشدگی طبیعی، افزایش قابل توجهی دارد. برای نمونه‌ای که در شرایط ۱۴۰۰-۱۰۲ ساخته شده بود، سختی اولیه برابر با HV ۱۱۵ بوده که پس از پیرشدگی به HV ۱۳۵ رسید. کمترین میزان سختی، معادل HV ۹۷، در محل اتصال بین لایه‌ی دوم و سوم مشاهده شد که همچنان از سختی ماده‌ی پایه‌ی پیرشده بیشتر بود. در مقایسه با نمونه‌ای که با دور موتور پایین‌تر تولید شده بود، نمونه‌ی تولیدشده با دور موتور بالاتر سختی یکنواختی کمتری داشت که این موضوع به تشکیل شدیدتر باندها نسبت داده شده است. پالانیول و همکاران [۲۴] اعلام کردند که مقدار استحکام کششی نهایی^۵ معادل ۴۰۰ MPa و استحکام تسلیم^۶ برابر با ۳۷۴ MPa به دست آمد که از مقادیر مشابه در مواد پایه‌ی نوردشده و پیرشده بیشتر بوده است. این موضوع نشان‌دهنده‌ی توانایی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در بهبود ریزساختار قطعات است. بیشینه شکل‌پذیری معادل ۱۶٪ برای قطعه‌ای که با دور موتور بالا تولید و تحت فرایند پیرشدگی قرار گرفته بود گزارش شد. این افزایش به پدیده‌ی سخت‌شدگی خطی پس از گذار ناگهانی از حالت الاستوپلاستیک نسبت داده شده است. درازکلا و همکاران [۲۵] نشان دادند که استحکام کششی کامپوزیت نسبت به

¹ Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ)

² Heat Affected Zone (HAZ)

³ Retreating Side (RS)

⁴ Additive Friction Stir Deposition (AFSD)

⁵ Ultimate Tensile Strength (UTS)

⁶ Yield Strength (YS)

ماده‌ی پایه‌ی متیل متاکریلات کمتر است. حداکثر بازده اتصال در این مطالعه برابر با ۷۰٪ گزارش شد. نتایج آزمایش خمش نشان داد که استحکام خمشی کامپوزیت بیشتر بوده و نسبت خمش به حداکثر مقدار آن به ۹۰٪ از مقدار مربوط به ماده‌ی پایه‌ی متیل متاکریلات رسید. بالاترین میزان استحکام خمشی نیز حدود ۶۸ MPa اندازه‌گیری شد. در بررسی هی و همکاران [۲۶] آزمایش کششی روی نمونه‌ی پایه و قطعه‌ی تولیدشده انجام شد. نتایج نشان داد که استحکام کششی نهایی و ازدیاد طول به ترتیب برابر با ۲۹۴ MPa و ۱۳/۱٪ بود که این مقادیر به ترتیب معادل ۶۱٪ و ۶۵٪ از مقادیر ماده‌ی پایه هستند. با افزایش مدت‌زمان پیرشدگی، مقدار استحکام کششی نهایی روند افزایشی داشت، درحالی‌که ازدیاد طول تغییر محسوسی نداشت. بالاترین مقدار استحکام کششی نهایی معادل ۳۵۲/۷ MPa برای نمونه‌ای به دست آمد که به مدت ۱۸۰ روز به‌صورت طبیعی پیر شده بود؛ این مقدار معادل ۷۳٪ از استحکام کششی نهایی ماده‌ی پایه است. در مطالعه‌ای توسط ون وانگ و همکاران [۲۸] که از روش پردازش اصطکاکی سرد پاششی برای تولید کامپوزیت آلومینیومی استفاده شد، نتایج نشان دادند که مقادیر استحکام کششی نهایی، تنش تسلیم و ازدیاد طول به ترتیب برابر با ۸۷ MPa، ۳۳ MPa و ۶۰/۳٪ بودند. این مقادیر نسبت به نمونه‌های تولیدشده با روش سردپاشی، به ترتیب ۴۵٪، ۳۳٪ و ۱۳۳۶٪ افزایش داشتند. همچنین، نرخ سخت‌شدگی کرنش در نمونه‌های پردازش اصطکاکی سرد پاششی بالاتر گزارش شد که این امر به دلیل درصد بالاتر مرزخانه‌های با زاویه بزرگ دانسته شد. در تحقیق موکھوپاده‌ی و همکاران [۲۹]، پودر آلومینیوم خالص روی زیرلایه‌ی آلومینیومی رسوب داده شد. نتایج نشان داد که استحکام کششی نهایی قطعه‌ی رسوب داده شده نسبت به آلومینیوم محلول‌سازی شده و آلومینیوم کرنش‌سخت‌شده به ترتیب ۶۳٪ و ۳۶٪ بیشتر بود. مقدار تنش تسلیم برای این قطعه ۷۸ MPa گزارش شد که به ترتیب ۳٪ و ۱۸۲٪ بیشتر از مقادیر مربوط به AA1060-H12 و AA1060-O است. افزایش استحکام به تشکیل ریزدانه‌ها از طریق فرایند تبلور مجدد دینامیکی پیوسته نسبت داده شد. همچنین پیشنهاد شد که با انجام عملیات پیرسازی پس از رسوب‌دهی می‌توان استحکام بیشتری به قطعه افزود. ازدیاد طول قطعه‌ی نهایی نیز در مقایسه با نمونه‌های AA1060-H12 و AA1060-O به ترتیب ۵۴/۱٪ و ۲۳/۳٪ افزایش نشان داد. مرور منابع نشان می‌دهد که فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به‌شدت به نوع ماده و ویژگی‌های آلیاژهای مورد استفاده وابسته است و انتخاب پارامترهای بهینه برای هر ترکیب نیازمند بررسی تجربی اختصاصی است. این وابستگی شدید به ماده باعث می‌شود که پارامترهای بهینه برای یک ترکیب آلیاژی لزوماً برای ترکیب دیگر قابل تعمیم نباشند. اغلب مطالعات تنها اثر یک یا دو پارامتر را بررسی کرده و تحلیل جامع چند پارامتر و تعامل آن‌ها کمتر انجام شده است. تاکنون هیچ پژوهشی اتصال دو آلیاژ Al1050 و Al3105 را به‌صورت هم‌زمان بررسی نکرده است. بنابراین مسئله اصلی تحقیق حاضر، بهینه‌سازی نظام‌مند پارامترهای اصلی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای این ترکیب غیرهمجنس با استفاده از روش‌های آماری طراحی آزمایش و تحلیل داده‌ها است. اهمیت این موضوع ناشی از نقش مستقیم آن در بهبود خواص مکانیکی، افزایش کیفیت اتصال، کاهش عیوب و ارائه دستورالعمل‌های قابل‌اعتماد برای کاربردهای صنعتی است. نوآوری این پژوهش در رویکردی جامع برای تعیین کیفیت جوش نهفته است؛ به‌طوری‌که با استفاده هم‌زمان از روش تاگوچی و تحلیل سیگنال به نویز، تأثیر پارامترهای مختلف به‌دقت تعیین شده و سپس با تحلیل ریزساختاری، کیفیت نهایی جوش سنجیده شده است.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش از دو نوع آلیاژ آلومینیوم به‌عنوان مواد اولیه استفاده شد. ورق پایینی از جنس آلومینیوم ۱۰۵۰ و ورق بالایی از جنس آلومینیوم ۳۱۰۵ انتخاب شدند. هر ورق دارای ضخامت مشخص بوده (۲ میلی متر)، پیش از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به ابعاد موردنیاز (۸۰×۱۴۰ میلی متر) برش داده شدند. برای آماده‌سازی، سطح ورق‌ها توسط سمباده‌کاری و شستشو با استون تمیز شد تا از حذف آلودگی‌ها و لایه‌های اکسیدی اطمینان حاصل گردد.

۲-۱- مواد اولیه

آلومینیوم ۱۰۵۰ یکی از آلیاژهای سری ۱xxx بوده و با خلوص بالای حدود ۹۹/۵٪ آلومینیوم شناخته می‌شود. برای معرفی دقیق‌تر ماده پایه، خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی آلومینیوم ۱۰۵۰ در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱ خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ [۲۵]

آلیاژ	چگالی	استحکام کششی نهایی	استحکام تسلیم	ازدیاد طول	سختی	مدول الاستیسیته
۱۰۵۰	۲/۷۱ g/cm ³	۱۱۰ MPa	۶۰ MPa	۳۵٪	۲۵ HB	۷۰ GPa

جدول ۲ جزئیات ترکیب عناصر آلومینیوم ۱۰۵۰ [۲۵]

آلیاژ	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	سایر	Al
۱۰۵۰	0.25≥	0.4≥	0.05≥	0.05≥	0.05≥	0.03≥	0.15≥	99.5≤

آلومینیوم ۳۱۰۵ یک آلیاژ سری xxx با افزودنی منیزیم و منگنز است که نسبت به سری xxx ۱ استحکام مکانیکی بالاتری دارد. این آلیاژ خواص خوب مقاومت به خوردگی، شکل پذیری مناسب و کاربرد گسترده در صنعت ساختمان و تجهیزات ورقی را ارائه می‌دهد. برای معرفی دقیق‌تر ماده پایه، خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی آلومینیوم ۳۱۰۵ در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۳ جزئیات ترکیب عناصر آلومینیوم ۳۱۰۵ [۲۵]

آلیاژ	چگالی	استحکام کششی نهایی	استحکام تسلیم	ازدیاد طول	سختی	مدول الاستیسیته
۳۱۰۵	۲/۷۲ g/cm ³	۱۴۵ MPa	۹۵ MPa	۲۵٪	۴۰ HB	۷۰ GPa

جدول ۴ جزئیات ترکیب عناصر آلومینیوم ۳۱۰۵ [۲۵]

آلیاژ	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ti	Zn	Al
۳۱۰۵	0.6≥	0.7≥	0.3≥	0.8-0.3	0.8-0.2	0.2≥	0.1≥	0.4≥	99.2-98.3

فولاد H13 یک فولاد کروم-مولیبدن-وانادیم آلیاژی پرمقاومت و با سختی بالا است که به‌طور گسترده برای ساخت ابزارهای داغ‌کار، قالب‌ها و اجزای ماشین‌کاری تحت دما و فشار بالا استفاده می‌شود. این فولاد خواص مکانیکی عالی، مقاومت مناسب به سایش و قابلیت عملیات حرارتی مطلوب دارد. خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی فولاد H13 در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شده است.

جدول ۵ خواص مکانیکی آلیاژ فولاد H13 [۳۱]

آلیاژ	چگالی	استحکام کششی نهایی	استحکام تسلیم	ازدیاد طول	سختی	مدول الاستیسیته
۱۰۵۰	۷/۸ g/cm ³	۱۴۰۰ MPa	۱۱۰۰ MPa	۱۲٪	۵۵-۵۰ HB	۲۱۰ GPa

جدول ۶ جزئیات ترکیب عناصر فولاد H13 [۳۱]

آلیاژ	Si	Mn	Cr	Pa	V	S	C	Mo
H13	1.2-0.8	0.5-0.2	5.5-4.75	0.03≥	1.2-0.8	0.03≥	0.45-0.32	1.75-1.1

فولاد H13 به دلیل مقاومت بالا در دماهای بالا، سختی مناسب، مقاومت به سایش و پایداری ابعادی، به‌طور گسترده برای ساخت ابزارهای فرایندهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انتخاب می‌شود. این ویژگی‌ها موجب می‌شوند که ابزار تحت بار مکانیکی و حرارتی شدید در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بدون تغییر شکل یا فرسایش سریع عملکرد قابل اعتمادی داشته باشد. آلومینیوم ۱۰۵۰ یک فلز پرکاربرد با خلوص بالا است که شکل‌پذیری بسیار خوب دارد، اما محدودیت‌هایی در ماشین‌کاری و مقاومت کششی پایین از جمله ضعف‌های آن محسوب می‌شوند. به همین دلیل، در این مطالعه اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بین Al3105 و Al1050 انجام شد تا با ترکیب این دو آلیاژ، خواص مکانیکی بهبود یابد. آلومینیوم ۳۱۰۵ با ۱۰۵۰ شباهت زیادی دارد و از نظر شکل‌پذیری و مقاومت به خوردگی نزدیک به آن است، اما با افزودن منگنز و منیزیم، استحکام و سختی بالاتری ارائه می‌دهد که به بهبود عملکرد ناحیه جوش کمک می‌کند.

۲-۲- تدوین آزمایش‌ها و مشخص کردن محدوده پارامترهای جوش

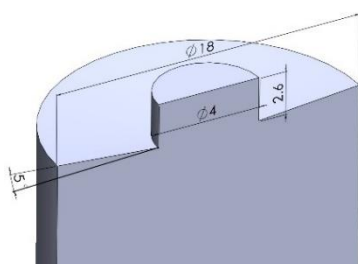
پس از بررسی مقالات متعدد در زمینه جوشکاری لبه روی هم آلومینیوم - آلومینیوم، پارامترهای مؤثر شامل سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی و هندسه ابزار انتخاب شدند. در مرحله نخست، جدول آزمایش مورد نظر تهیه شده است و از آن جایی که سه متغیر در سه سطح می باشد از آرایه متعامد L_9 تاگوچی استفاده شده است و مناسب ترین هندسه ابزار، سرعت چرخشی و سرعت پیشروی، از نظر سیلان مواد در منطقه اغتشاشی و استحکام کششی تعیین می شود. جدول ۷ محدوده پارامترهای در نظر گرفته شده در این مرحله را نشان می دهد. برای بررسی شکل هندسی پین، از سه نوع ابزار با پین استوانه‌ای و مخروطی ناقص و هرمی ناقص استفاده شد. محدوده پارامترها مطابق با پژوهش ژائو [۳۲] تعیین شد.

جدول ۷ محدوده پارامترهای و جدول آزمایش [۲۷]

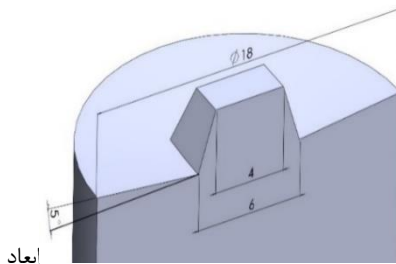
شماره	هندسه ابزار	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت چرخشی (rpm)
۱	هرمی ناقص	۳۰	۴۰۰
۲	هرمی ناقص	۶۰	۶۰۰
۳	هرمی ناقص	۹۰	۸۰۰
۴	مخروطی ناقص	۳۰	۶۰۰
۵	مخروطی ناقص	۶۰	۸۰۰
۶	مخروطی ناقص	۹۰	۴۰۰
۷	استوانه‌ای	۳۰	۸۰۰
۸	استوانه‌ای	۶۰	۴۰۰
۹	استوانه‌ای	۹۰	۶۰۰

۳-۳- ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

ابزار مورد استفاده در این پژوهش از جنس فولاد H۱۳ با قطر شانه ۱۸ میلی متر انتخاب شد. ابعاد و مقیاس ابزارهای مورد نظر از پژوهش‌های انجام شده انتخاب شد [۲۸]. این نوع فولاد به دلیل استحکام مناسب و قابلیت ماشین کاری آسان برای آزمایش‌های تحقیقاتی گزینه‌ای مطلوب به شمار می رود. از آنجاکه فولاد تندبر در دماهای بالای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دچار افت سختی می شود، جهت جبران این مسئله عملیات حرارتی بر روی ابزار انجام گرفت. این عملیات باعث افزایش سختی و مقاومت سایشی ابزار و در نتیجه بهبود دوام آن در طول فرایند گردید. ابعاد دقیق ابزار در شکل ۱ نشان داده شده است.

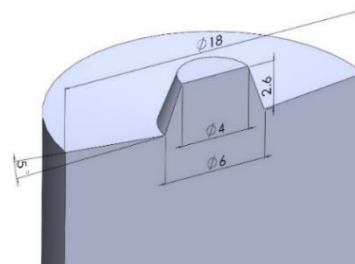


ابعاد پین استوانه



ابعاد

پین هرمی ناقص



ابعاد پین مخروطی ناقص



شکل پین استوانه‌ای



شکل پین هرمی ناقص



شکل پین مخروط ناقص

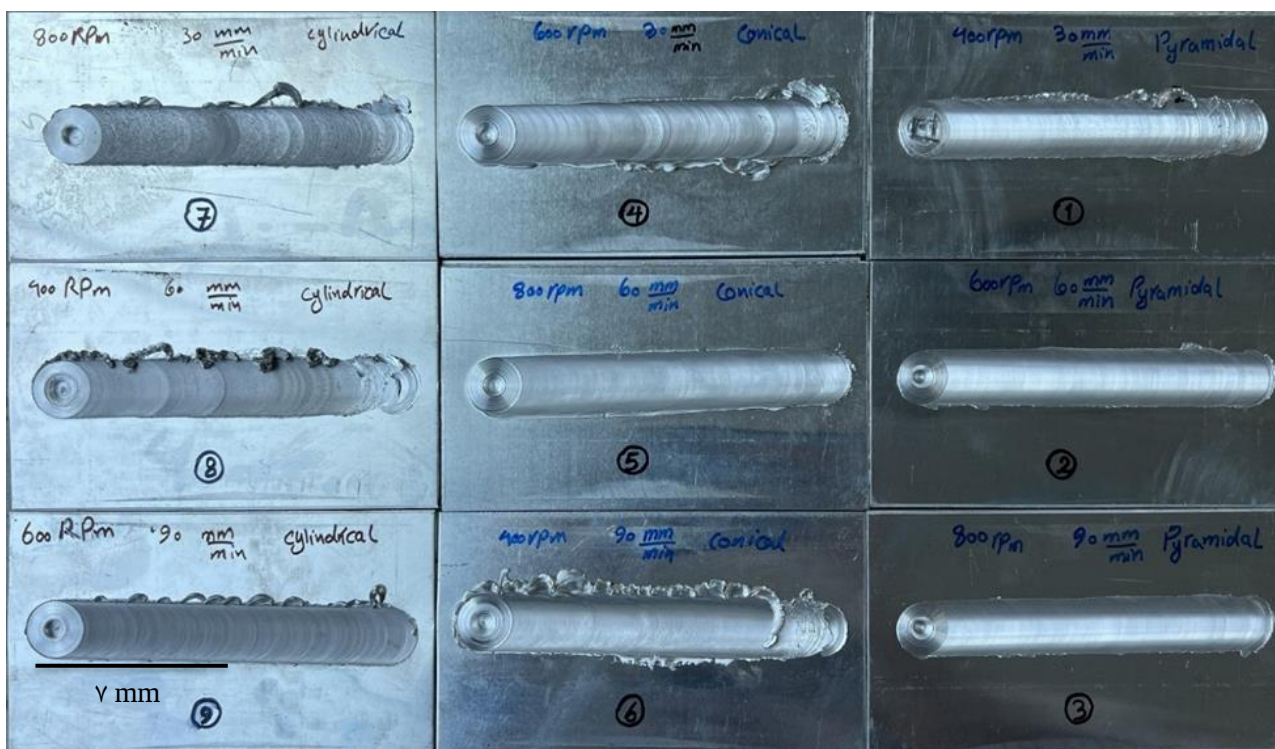
شکل ۱ اشکال و ابعاد پین‌های مورد استفاده

۳- نتایج و بحث

در این مطالعه، سه متغیر در سه سطح مورد بررسی قرار گرفتند و سایر متغیرها ثابت ماندند. هدف از این مرحله، تعیین محدوده‌ی بهینه‌ی هر پارامتر برای دستیابی به جوش مناسب بود. پس از آن، اثر متقابل پارامترها نیز در فرایند بهینه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای شناسایی پارامترهای بهینه فرایند، آزمایش‌های کشش بر روی نمونه‌های مختلف انجام شد. در ادامه، به‌منظور تحلیل دقیق‌تر کیفیت اتصال و شناسایی احتمالی عیوب یا ناپیوستگی‌ها در ناحیه جوش، تصاویر ریزساختاری از مقاطع عرضی نمونه‌ها تهیه شد و مورد بررسی قرار گرفت. این مجموعه آزمایش‌ها امکان مقایسه نمونه‌ها و تعیین ترکیب مناسب‌تر پارامترها را فراهم می‌سازد.

۳-۱- نمونه‌های جوش داده شده

عملیات جوشکاری، با سرعت چرخشی در محدوده ۴۰۰ تا ۸۰۰ دور در دقیقه، سرعت خطی ۳۰ تا ۹۰ میلی‌متر در دقیقه و هندسه ابزار هرمی ناقص، مخروطی و استوانه‌ای انجام شد (طبق جدول ۷). شکل ۲، سطح بیرونی نمونه‌های جوش داده شده را نمایش می‌دهد.

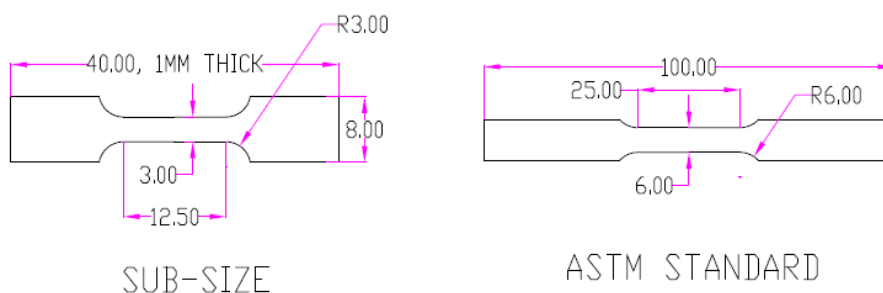


شکل ۲ نمونه‌های جوش داده شده

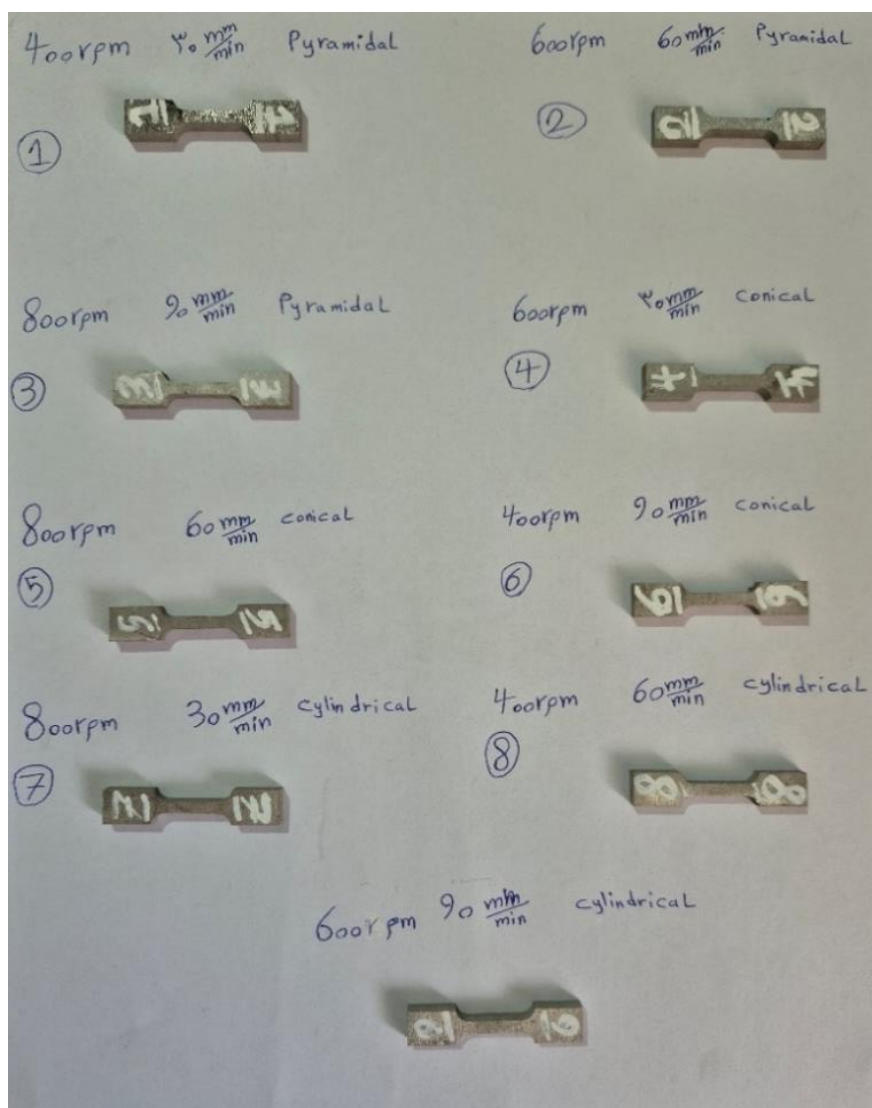
همان‌طور که مشاهده می‌شود، ورق آلومینیوم ۳۱۰۵ در برخی نمونه‌ها مانند ۲، ۳ و ۵ با کیفیت ظاهری مطلوب جوش داده شده‌اند. با این حال، در برخی دیگر از نمونه‌ها، از جمله ۴، ۷، ۸ و ۹ سطح بالایی جوش صاف و بدون عیب نمی‌باشد و سطح زیر مشاهده شده است. عیب حفره در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولاً در سمت پیشرو اتصال رخ می‌دهد. این مشکل زمانی ایجاد می‌شود که ماده، پس از عبور ابزار از یک مقطع، از سمت پسرو به سمت پیشرو حرکت می‌کند؛ اما از آنجا که در این ناحیه اغتشاشی وجود ندارد، ماده به‌قدر کافی برای پر کردن فضای پیشرو در دسترس نمی‌باشد که نتیجه آن تشکیل حفره‌ای تونلی شکل خواهد بود. در برخی منابع، نسبت سرعت چرخشی به‌سرعت خطی ابزار به‌عنوان شاخصی برای میزان حرارت ورودی جوشکاری معرفی شده است. اگر حرارت ورودی بیش از حد کم باشد، عیوب بیشتر شده و حفره‌ها بزرگ‌تر می‌شوند. در مقابل، با افزایش حرارت، میزان خمیری شدن ماده افزایش یافته و اثرات عدم اغتشاش جبران می‌شود که به کاهش عیوب کمک می‌کند. با این حال، در شرایط حرارت ورودی بسیار بالا، جریان مواد حالت تلاطمی پیدا کرده و مجدداً عیب تونلی ظاهر می‌شود [۲۹].

۲-۳- آزمایش کشش

آزمایش کشش یکی از مهم‌ترین روش‌های ارزیابی استحکام مکانیکی اتصالات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است. این آزمایش برای تعیین حداکثر استحکام کششی و رفتار شکست نمونه‌ها انجام می‌شود. نمونه‌های جوش داده شده تحت سرعت 5 mm/min قرار گرفت تا نقطه شکست آن‌ها ثبت شود. آزمایش کشش مطابق استانداردهای متداول [۳۰] بر روی نمونه‌های جوشکاری شده اجرا شد. تغییر شکل و رفتار مکانیکی نمونه‌ها به صورت تجربی اندازه‌گیری و منحنی تنش - کرنش رسم گردید. تحقیقات نشان داد که مقدار استحکام کششی نمونه‌ها تحت تأثیر شرایط فرایند جوشکاری قرار دارد. شکل‌های ۳ و ۴ هندسه و ابعاد نمونه کشش را نشان می‌دهد.



شکل ۳ ابعاد نمونه‌های آزمایش کشش [۳۰]



شکل ۴ هندسه نمونه‌های آزمایش کشش

نمونه‌ها با دستگاه (۵۰ - سنتام) بررسی شد و نتایج آزمایش کشش نشان داد که نمونه‌هایی که در شرایط بهینه جوشکاری شده‌اند، دارای استحکام بالاتری بوده و رفتار مکانیکی مناسبی دارند. در مقابل، برخی از نمونه‌ها که تحت شرایط نامناسب فرایند جوشکاری قرار گرفته‌اند، نقص‌هایی مانند شکست زود هنگام، کاهش چقرمگی و عدم پیوستگی مناسب در ناحیه جوش را نشان داده‌اند. در شکل ۵ دستگاه آزمایش کشش مورد استفاده است.



شکل ۵ دستگاه آزمایش کشش مورد استفاده

۳-۳- داده‌های آزمایش کشش

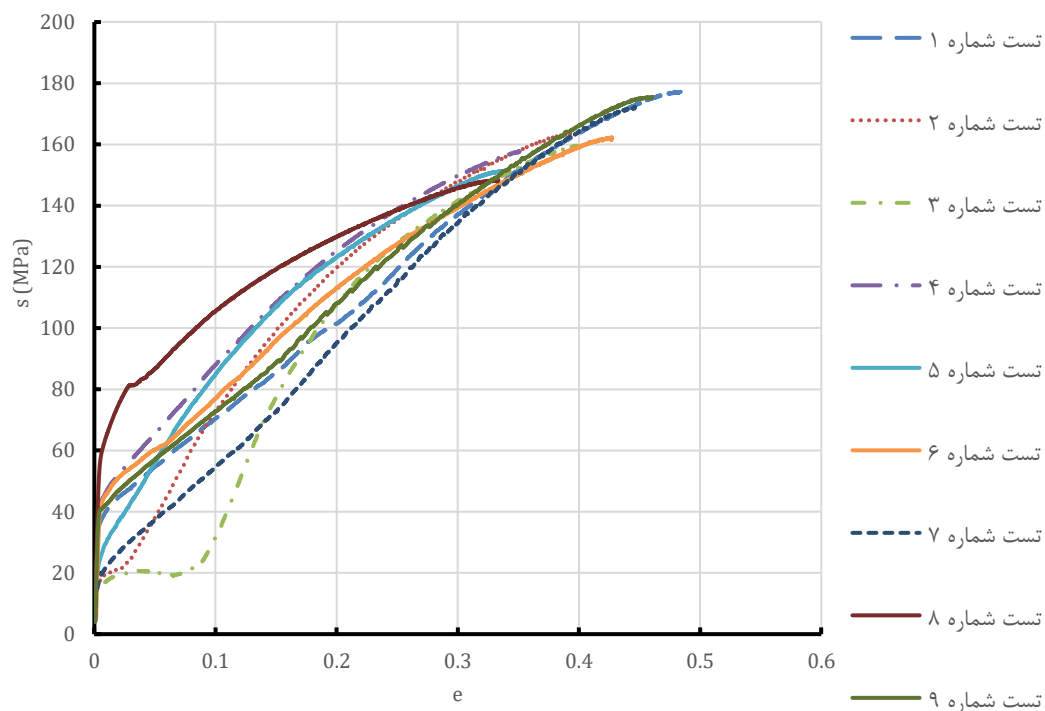
داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های کشش برای نمونه‌های مختلف در جدول ۸ ارائه شده‌اند. به منظور افزایش دقت و ارزیابی قابلیت تکرارپذیری، هر آزمایش سه مرتبه تکرار گردید و میانگین مقادیر به عنوان مبنای تحلیل در نظر گرفته شد. بررسی این داده‌ها امکان مقایسه رفتار مکانیکی نمونه‌ها و شناسایی ترکیب مناسب تر پارامترهای فرایند را فراهم می‌سازد.

جدول ۸ داده‌های آزمایش کشش

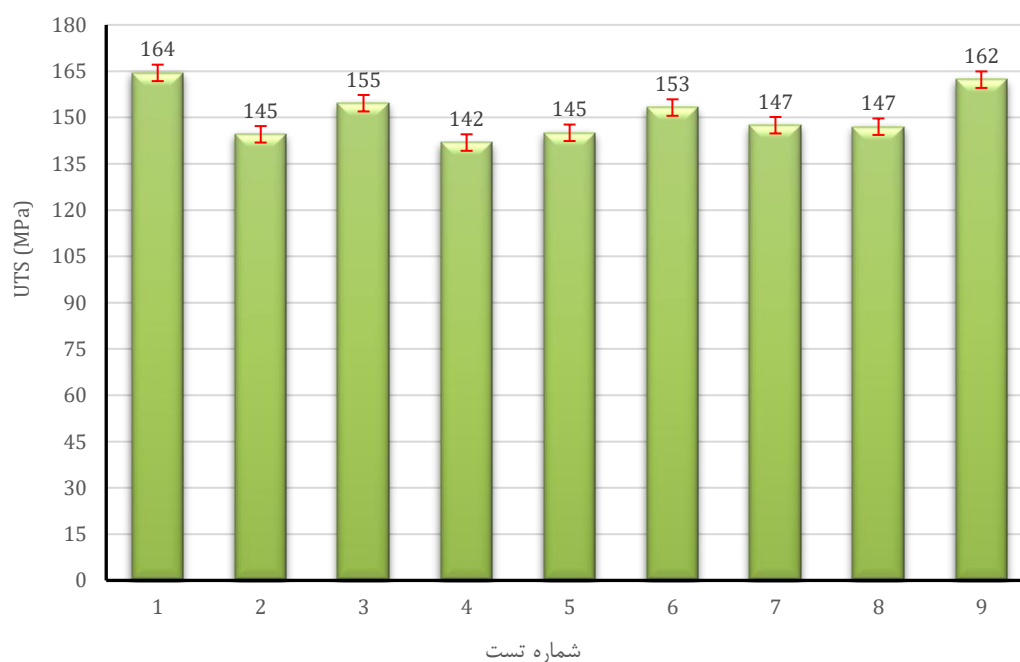
شماره آزمایش	تکرار اول		تکرار دوم		تکرار سوم		میانگین	
	e %	UTS (MPa)	e %	UTS (MPa)	e %	UTS (MPa)	e %	UTS (MPa)
۱	۴۶/۹۱	۱۶۴/۱	۳۰/۹۹	۱۵۲/۰۳	۴۸/۴۰	۱۷۷/۲۲	۴۲/۱	۱۶۴/۴۵
۲	۲۰/۶۱	۱۳۵/۹۳	۳۹/۳۴	۱۶۰/۸	۲۳/۴۳	۱۳۶/۸۹	۲۷/۷۹	۱۴۴/۵۴
۳	۳۳/۸۶	۱۵۵/۳	۴۰/۳۶	۱۵۹/۸۴	۳۳/۳۸	۱۴۸/۷۳	۳۵/۸۷	۱۵۴/۶۲
۴	۲۵/۴۷	۱۲۱/۱۴	۲۹/۳۳	۱۴۶/۹۷	۳۵/۱۱	۱۵۷/۷۲	۲۳/۹۷	۱۴۱/۹۴
۵	۳۳/۶۹	۱۵۱/۴۰	۲۷/۱۵	۱۳۹/۱	۳۰/۹۹	۱۴۴/۶۲	۳۰/۶۱	۱۴۵/۰۵
۶	۲۶/۰۶	۱۴۰/۶۸	۴۰/۳۴	۱۵۶/۶۱	۴۲/۷۲	۱۶۲/۳۶	۳۶/۳۷	۱۵۳/۲۲
۷	۱۶/۷۵	۱۱۳/۳۹	۳۵/۹۶	۱۵۶/۷۷	۴۴/۶۲	۱۷۲/۳۲	۳۲/۴۴	۱۴۷/۴۹
۸	۳۰/۸۹	۱۴۷/۰۲	۳۳/۵۰	۱۴۸/۳۷	۳۲/۳۳	۱۴۵/۶۶	۳۲/۲۴	۱۴۷/۰۱
۹	۳۲/۷۷	۱۵۱/۲۲	۳۸/۶۹	۱۶۰/۰۳	۴۶/۰۲	۱۷۵/۵	۳۹/۱۶	۱۶۲/۲۵

همانطور که در شکل‌های ۶ و ۷ مشخص است، نتایج آزمایش کشش روی نمونه‌های تهیه شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نشان داد که این فرایند قابلیت ایجاد اتصالات مکانیکی پایدار و قابل قبول میان دو آلیاژ نامشابه آلومینیوم ۱۰۵۰ و ۳۱۰۵ را

دارد. میانگین کلی تنش نهایی در تمام آزمایش‌ها برابر با $151/58 \text{ MPa}$ به دست آمد که از مقدار معمول برای آلیاژ 1050 (حدود 110 MPa) بیشتر و نسبت به آلیاژ 3105 (حدود 145 MPa) کمتر است. این اختلاف نشان می‌دهد که کیفیت اتصال بین‌لایه‌ای ایجاد شده مطلوب بوده، اما ناحیه جوش همچنان نقاط ضعیف‌تری در مقایسه با آلیاژ قوی‌تر یعنی 3105 دارد.



شکل ۶ نمودار تنش - کرنش نمونه‌ها



شکل ۷ نمودار استحکام کششی نهایی برای آزمایش

از نظر مقادیر بیشینه، بیشترین میانگین تنش نهایی برابر با ۱۶۴/۴۵ MPa و ازدیاد طول برابر با ۴۲/۱٪ در آزمایش اول به دست آمد. همچنین بالاترین مقدار مطلق تنش نهایی معادل ۱۷۷/۲۲ MPa و همراه با ازدیاد طول ۴۸/۴۰٪ در همان آزمایش (تکرار سوم) ثبت شد. در مقابل، کمترین میانگین تنش نهایی معادل ۱۴۱/۹۴ MPa و ازدیاد طول ۲۳/۹۷٪ در آزمایش اول (تکرار چهارم) مشاهده شد. همچنین کمترین مقدار مطلق تنش نهایی ۱۱۳/۳۹ MPa با ازدیاد طول ۱۶/۷۵٪ مربوط به آزمایش هفت (تکرار اول) بود. این تفاوت‌ها به خوبی نشان می‌دهد که تغییرات پارامترهای فرایند می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر استحکام نهایی و شکل‌پذیری نمونه‌ها داشته باشد. یکی از نکات قابل توجه در نتایج، پایداری و تکرارپذیری مناسب فرایند است. در بیشتر آزمایش‌ها اختلاف بین سه تکرار کمتر از ۱۰٪ بود که نشان‌دهنده ثبات در شرایط فرایندی و اعتمادپذیری نتایج است. با این حال، آزمایش شماره هفت رفتاری متفاوت داشت و بیشترین پراکندگی داده‌ها را نشان داد؛ به‌طوری که تنش نهایی آن از ۱۱۳/۳۹ MPa تا ۱۷۲/۳۳ MPa تغییر کرد. این گستره وسیع می‌تواند ناشی از نقص در نفوذ لایه‌ها، نوسانات پارامترهای فرایند یا حتی انحراف در شرایط عملیاتی باشد که نشان می‌دهد پارامترهای این آزمایش با شرایط بهینه فاصله داشته‌اند.

بررسی رفتار مکانیکی ترکیب ۳۱۰۵/۱۰۵۰ نیز بیانگر این موضوع است که استحکام نهایی اتصال تا حد زیادی به کیفیت پیوند در سطح مشترک وابسته است. از آنجا که آلومینیوم ۱۰۵۰ نرم‌تر است، ناحیه اتصال نقش اصلی در انتقال تنش ایفا می‌کند. محدوده میانگین نتایج، یعنی ۱۴۰ تا ۱۶۵ MPa، نشان‌دهنده آن است که بارگذاری به طور نسبتاً یکنواخت از طریق ناحیه جوش منتقل شده و ساختار ایجاد شده توسط فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از مقاومت و پایداری مناسبی برخوردار است. این موضوع اهمیت کنترل دقیق شرایط فرایندی از جمله سرعت پیشروی، سرعت دورانی و فشار محوری ابزار را آشکار می‌سازد.

به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی توانسته است خواص مکانیکی مناسبی در اتصال دو آلیاژ نامشابه آلومینیوم ایجاد کند. بهترین نتایج از نظر استحکام و ازدیاد طول مربوط به آزمایش اول بود که احتمالاً ناشی از انتخاب بهینه پارامترهای فرایندی بوده است. این موضوع تأیید می‌کند که تنظیم صحیح متغیرهای فرایند نقش کلیدی در بهبود کیفیت نهایی اتصال دارد. در عین حال، وجود نوسانات محدود در برخی آزمایش‌ها نیز گویای آن است که فرایند نیازمند کنترل بیشتر در برخی شرایط خاص است تا از ایجاد ضعف‌های احتمالی جلوگیری شود.

در مجموع، یافته‌های به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌تواند به‌عنوان یک روش کارآمد و نوین برای اتصال آلیاژهای آلومینیومی نامشابه مورد استفاده قرار گیرد. این روش نه تنها قابلیت تولید اتصالات مقاوم و پایدار را دارد، بلکه با کنترل صحیح پارامترهای عملیاتی، می‌تواند کیفیتی نزدیک به خواص آلیاژ قوی‌تر (۳۱۰۵) ایجاد کند. بنابراین، این نتایج اهمیت بالقوه‌ی این فناوری را در صنایع مختلف به‌ویژه در حوزه‌های نیازمند اتصالات سبک و مقاوم، مانند خودروسازی و هوافضا، برجسته می‌سازد.

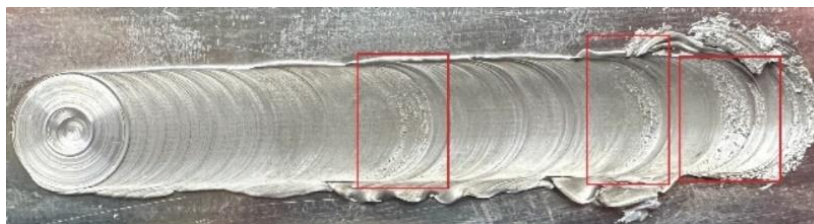
۳-۴- عیوب جوش

در صورت عدم کنترل دقیق پارامترهای فرایند، ممکن است عیوبی در قطعه نهایی پدید آید که کارایی مکانیکی آن را کاهش دهد. مطالعات نشان داده‌اند که مهم‌ترین عیوب ایجادشده در تولید افزودنی اصطکاکی اغتشاشی شامل موارد زیر است:

- (۱) حفره‌های داخلی که در اثر اختلاط ناقص ماده در ناحیه بین لایه‌ها ایجاد می‌شوند؛
- (۲) عدم پیوستگی بین لایه‌ای که ممکن است ناشی از سرعت پیشروی زیاد یا چرخش ناکافی ابزار باشد؛
- (۳) ناهمگنی ریزساختاری که اغلب در اثر انتقال حرارت و کرنش غیریکنواخت در طول مسیر جوش رخ می‌دهد؛
- (۴) ناصافی سطح یا زبری بیش از حد که معمولاً ناشی از طراحی نامناسب هندسه ابزار یا عدم تطابق سرعت چرخش و پیشروی است [۳۱].

در این پژوهش، به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی بر بروز این عیوب، از روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که نوع ابزار و نرخ چرخش آن نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش حفره‌های داخلی و بهبود اتصال بین لایه‌ای ایفا می‌کنند. به‌ویژه ابزار استوانه‌ای با سطح تماس بیشتر باعث بهبود جریان ماده و همگن‌سازی بهتر در ناحیه ساخت شده است. این یافته‌ها با نتایج گزارش‌شده در ادبیات موضوع نیز همخوانی دارد [۳۲-۳۷]. در جدول ۹ عیوب تشکیل شده در نمونه‌های آزمایش، نمایش داده شده است.

جدول ۹ عیوب تشکیل شده در نمونه های جوش



ناصافی سطح یا زبری آزمایش ۴



عدم پیوستگی بین لایه‌ای آزمایش ۴



عدم پیوستگی بین لایه‌ای آزمایش ۴



حفره‌های داخلی آزمایش ۴



حفره‌های داخلی آزمایش ۴



ناصافی سطح یا زبری آزمایش ۷



حفره‌های داخلی و عدم پیوستگی بین لایه‌ای آزمایش ۷



حفره‌های داخلی آزمایش ۷



ناصافی سطح یا زبری آزمایش ۸



حفره‌های داخلی آزمایش ۸



عدم پیوستگی بین لایه‌ای آزمایش ۸

۳-۵- بهینه سازی پارامترها

به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای هندسه ابزار (A)، سرعت پیشروی (B) و سرعت چرخشی (C) بر نسبت سیگنال به نویز، تحلیل مدل خطی با استفاده از نرم‌افزار مینی تب انجام شد. نتایج در جدول‌های ۱۰ تا ۱۲ نشان داده شد.

جدول ۱۰ ضرایب مدل تخمینی برای نسبت سیگنال به نویز

P	T	SE Coef	Coef	Term
۰/۰۰۰	۲۵۹/۵۳۰	۰/۱۶۷۹	۴۳/۵۷۶۹	Constant
۰/۵۱۶	۰/۷۸۲	۰/۲۳۷۵	۰/۱۸۵۷	A 1
۰/۴۰۲	-۱/۰۵۶	۰/۲۳۷۵	-۰/۲۵۰۸	A 2
۰/۹۹۰	-۰/۰۱۵	۰/۲۳۷۵	-۰/۰۰۳۵	B 1
۰/۳۱۲	-۱/۳۳۹	۰/۲۳۷۵	-۰/۳۱۸۱	B 2
۰/۴۷۳	۰/۸۷۸	۰/۲۳۷۵	۰/۲۰۸۴	C 1
۰/۷۲۸	-۰/۴۰۰	۰/۲۳۷۵	-۰/۰۹۵۰	C 2

جدول ۱۱ خلاصه مدل

R-Sq (adj)	R-Sq	S
٪۰/۰۰	٪۶۸/۷۲	۰/۵۰۳۷

جدول ۱۲ تحلیل واریانس برای نسبت های سیگنال به نویز

P	F	Adj MS	Adj SS	Seq SS	DF	Source
۰/۶۲۵	۰/۶۰	۰/۱۴۲۴۶	۰/۳۰۴۹	۰/۳۰۴۹	۲	A
۰/۴۵۳	۱/۲۱	۰/۳۰۶۸۶	۰/۶۱۳۷	۰/۶۱۳۷	۲	B
۰/۷۲۱	۰/۳۹	۰/۰۹۸۰۲	۰/۱۹۶۰	۰/۱۹۶۰	۲	C
		۰/۲۵۳۷۳	۰/۵۰۷۵	۰/۵۰۷۵	۲	Residual Error
				۱/۶۲۲۱	۸	Total

نتایج حاصل از مدل نشان داد که هیچ‌یک از سطوح عوامل مورد بررسی دارای اثر معنادار آماری بر پاسخ سیگنال به نویز نیستند ($P\text{-value} > ۰/۰۵$). ضریب تعیین مدل برابر با ۶۸/۷۲٪ بود، اما مقدار $R\text{-Sq}(\text{adj})$ صفر گزارش شد که نشان‌دهنده عدم کفایت مدل در پیش‌بینی پاسخ است. همچنین، نتایج آنالیز واریانس بیانگر آن بود که هیچ‌یک از عوامل A، B و C تأثیر معناداری بر پاسخ نداشتند، به‌طوری‌که مقادیر P برای تمامی عوامل بیشتر از ۰/۴ گزارش شد. یکی از دلایل اصلی عدم معناداری آماری نتایج، محدود بودن تعداد آزمایش‌ها و در نتیجه کاهش درجه آزادی مدل است. در این مطالعه، تعداد مشاهدات پایین باعث شد که توان آزمون آماری کاهش یابد و مدل نتواند تفاوت‌های واقعی بین سطوح عوامل را با اطمینان کافی تشخیص دهد. همچنین، درجه آزادی خطای پایین ($DF=۲$) موجب شد که آزمون F در آنالیز واریانس حساسیت کافی نداشته باشد. این محدودیت آماری منجر به مقادیر P بالا و ضریب تعیین تعدیل شده صفر شد که نشان‌دهنده ضعف مدل در توضیح تغییرات پاسخ است. بنابراین، افزایش تعداد آزمایش‌ها در مطالعات آتی می‌تواند به بهبود دقت آماری و اعتبار نتایج منجر شود. با وجود عدم معناداری آماری، به‌منظور تعیین ترکیب بهینه عوامل برای دستیابی به بیشترین نسبت سیگنال به نویز، از جدول پاسخ سیگنال به نویز و اصل "بزرگ‌تر بهتر است" استفاده شد. بر اساس این جدول، سطح بهینه برای هر عامل به‌صورت زیر تعیین شد:

➤ عامل A: سطح ۱ با مقدار سیگنال به نویز برابر با ۴۳/۷۸

➤ عامل B: سطح ۳ با مقدار سیگنال به نویز برابر با ۴۳/۹۰

➤ عامل C: سطح ۱ با مقدار سیگنال به نویز برابر با ۴۳/۷۹

مقادیر دامنه نشان داد که عامل B با مقدار ۰/۶۲ بیشترین تأثیر را بر پاسخ داشته و در رتبه اول قرار گرفت، در حالی که عوامل A و C به‌ترتیب با مقادیر ۰/۴۸ و ۰/۳۲ در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند. بنابراین، ترکیب بهینه عوامل برای دستیابی به بیشترین نسبت سیگنال به نویز به‌صورت A1-B3-C1 پیشنهاد می‌شود. در ادامه نمونه محاسبه برای عامل هندسه در سطح ۱ (هرم ناقص) بیان شده است.

$$1 \text{ آزمون } S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{3} \sum_{i=1}^n \frac{1}{164/105^2} + \frac{1}{150/99^2} + \frac{1}{177/22^2} \right) = 44/35$$

$$2 \text{ آزمون } S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{3} \sum_{i=1}^n \frac{1}{165/93^2} + \frac{1}{160/80^2} + \frac{1}{136/89^2} \right) = 43/22$$

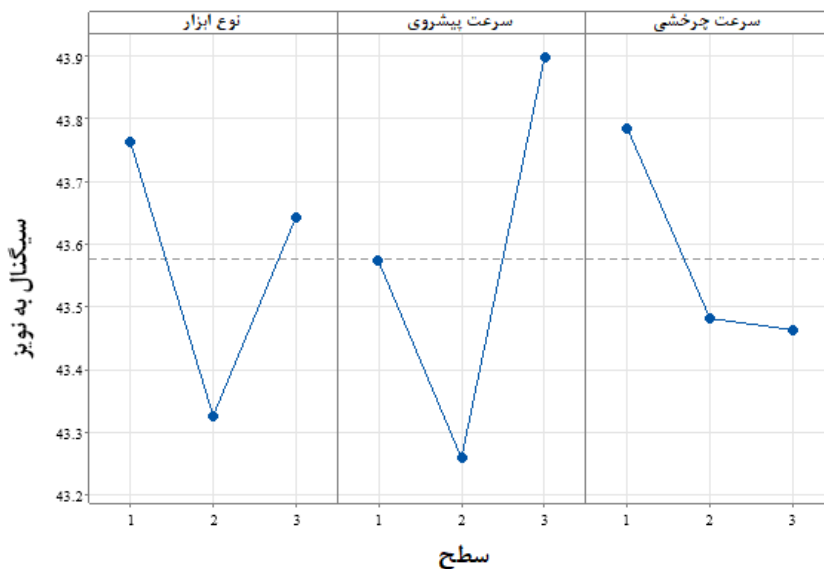
$$3 \text{ آزمون } S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{3} \sum_{i=1}^n \frac{1}{155/30^2} + \frac{1}{159/84^2} + \frac{1}{148/73} \right) = 43/77$$

$$S/N = \frac{44/35 + 43/22 + 43/77}{3} = 43/78$$

جدول ۱۳ نتایج بهینه‌سازی به روش سیگنال به نویز

سطح	هندسه ابزار	سرعت پیشروی	سرعت چرخشی
۱	۴۳/۷۸	۴۳/۵۷	۴۳/۷۹
۲	۴۳/۳۳	۴۳/۲۸	۴۳/۵
۳	۴۳/۶۴	۴۳/۹	۴۳/۴۶
دامنه	۰/۴۸	۰/۶۲	۰/۳۲
تأثیر	۲	۱	۳

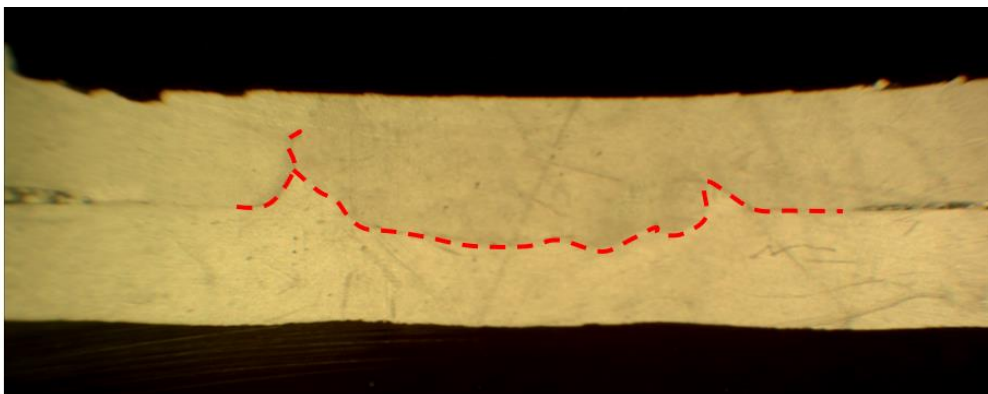
نتایج حاصل از تحلیل به روش سیگنال به نویز در شکل ۸ ارائه شده است. بر اساس این داده‌ها، سرعت پیشروی: ۹۰ mm/min، سرعت چرخشی: ۴۰۰ rpm و نوع ابزار هر می ناقص مشخص گردید و در میان عوامل بررسی شده، سرعت پیشروی بیشترین اثر را بر استحکام کششی نمونه‌ها داشته است. سایر پارامترها نیز بر اساس میزان تأثیرگذاری در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند.



شکل ۸ گراف بهینه‌سازی بر اساس روش سیگنال به نویز

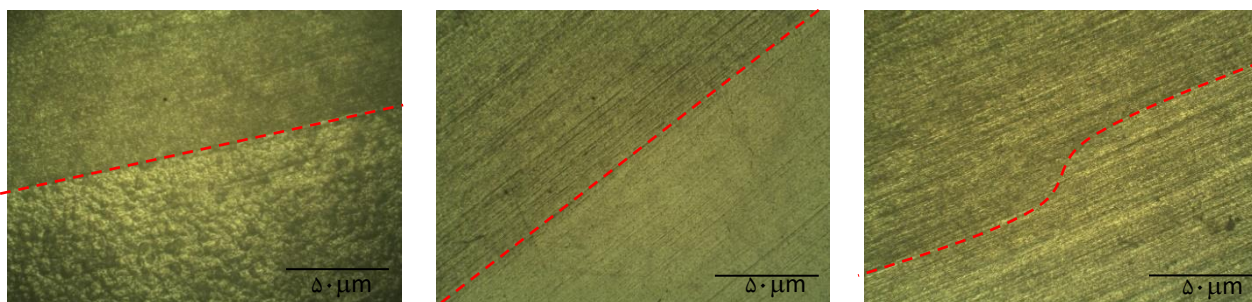
۳-۶- ریز ساختار

شکل ۹ تصویر میکروسکوپی ناحیه جوش بین آلومینیوم ۱۰۵۰ (ورق پایینی) و ۳۱۰۵ (ورق بالایی) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو فلز به‌خوبی با یکدیگر ترکیب شده‌اند و هیچ جدایش یا نقص واضحی در ناحیه اتصال دیده نمی‌شود. این نشان‌دهنده کیفیت بالای جوش و نفوذ کامل مواد در شرایط پارامترهای بهینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است و تأییدی بر کارایی مناسب فرایند برای این ترکیب غیرهمجنس می‌باشد.



شکل ۹ تصویر ماکروسکوپی از لایه اتصال در شرایط بهینه

برای ارزیابی کیفیت اتصال و تحلیل ریزساختار، تصاویر میکروسکوپی از مقاطع عرضی نمونه‌های جوش تهیه شد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در مرز جوش هیچ اختلال یا ناپوستگی قابل توجهی دیده نمی‌شود و اتصال بین لایه‌های آلومینیوم ۱۰۵۰ و ۳۱۰۵ به‌طور کامل انجام شده است. علاوه بر این، توزیع یکنواخت ساختار در ناحیه جوش، نفوذ کامل مواد و اختلاط مناسب فلزات غیرهمجنس را نشان می‌دهد. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده کیفیت بالای جوش، پیوستگی مناسب و عملکرد مطلوب در شرایط پارامترهای بهینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی هستند. به‌منظور ارائه اطلاعات دقیق‌تر، توصیه می‌شود تصاویر شامل مقیاس مناسب باشند تا ابعاد و اندازه‌های واقعی ناحیه جوش برای خواننده مشخص گردد.



شکل ۱۰ تصاویر میکروسکوپی از لایه‌های سطحی قطعه

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله بهینه‌سازی پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای بهبود خواص مکانیکی و کارایی آن بررسی شده است. نتایج کلی به‌دست‌آمده از این پژوهش به شرح زیر است:

- (۱) انتخاب ابزار با هندسه هرم ناقص منجر به بهبود استحکام کششی شده است. مطالعات نشان داده‌اند که هندسه ابزار تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی جوش دارد.
- (۲) افزایش سرعت پیشروی تا ۹۰ mm/min باعث بهبود استحکام کششی شده است. این افزایش سرعت منجر به کاهش زمان تماس ابزار با ماده و در نتیجه کاهش ورودی حرارتی می‌شود.
- (۳) انتخاب سرعت دورانی پایین‌تر ۴۰۰ rpm منجر به بهبود استحکام کششی شده است. سرعت‌های دورانی بالاتر می‌توانند منجر به افزایش بیش از حد حرارت ورودی شوند.
- (۴) نتایج ریزساختاری نشان داد که قطعاتی که تحت شرایط پارامترهای بهینه فرایند تولید شده‌اند، دارای تصاویر ریزساختاری منظم‌تر و یکنواخت‌تر در ناحیه جوش بوده‌اند. این مشاهدات حاکی از کیفیت بالاتر اتصال و توزیع مناسب‌تر مواد در مرز جوش نسبت به نمونه‌هایی با پارامترهای غیربهینه است و اهمیت انتخاب صحیح پارامترهای فرایند را در بهبود خواص مکانیکی و کیفیت جوش تأیید می‌کند.

در مجموع، انتخاب ابزار با هندسه هرم ناقص، افزایش سرعت پیشروی تا ۹۰ mm/min و استفاده از سرعت دورانی پایین تا ۴۰۰ rpm در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی منجر به بهبود استحکام کششی شده است. این نتایج با یافته‌های مطالعات پیشین همخوانی دارد و می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای بهینه‌سازی پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد استفاده قرار گیرد.

References

- [1] Elyasi M, Aghajani Derazkola H, Hosseinzadeh M. Investigations of tool tilt angle on properties friction stir welding of A441 AISI to AA1100 aluminium. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2016 Jul;230(7):1234-41. doi: 10.1177/0954405416645986
- [2] Elyasi M, Khoram D, Aghajani Derazkola H, Mirnia MJ. Effects of process parameters on properties of friction stir additive manufactured copper. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023 Aug;127(11):5651-64. doi: 10.1007/s00170-023-11931-y
- [3] Derazkola HA, Elyasi M. The influence of process parameters in friction stir welding of Al-Mg alloy and polycarbonate. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018 Oct 1;35:88-98. doi: 10.1016/j.jmapro.2018.07.021
- [4] Elyasi M, Taherian J, Hosseinzadeh M, Kubit A, Derazkola HA. The effect of pin thread on material flow and mechanical properties in friction stir welding of AA6068 and pure copper. *Heliyon*. 2023 Apr 1;9(4). doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14752
- [5] Khorram D, Elyasi M, Mirnia MJ, Derazkola HA. Characterization of copper-graphene nanocomposite block prepared by friction stir additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*. 2025 Sep;10(9):6805-24. doi: 10.1007/s40964-025-01008-5.
- [6] Derazkola HA, Garcia E, Elyasi M. Underwater friction stir welding of PC: Experimental study and thermo-mechanical modelling. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021 May 1;65:161-73. doi: 10.1016/j.jmapro.2021.03.034
- [7] Derazkola HA, Elyasi M. Cooling-assist friction stir welding: A case study on AA6068 aluminum alloy and copper joint. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2024 Oct;238(12):1837-50. doi: 10.1177/09544054231209779
- [8] NAQIBI MF, Elyasi M, AVAL HJ, Mirnia MJ. Theoretical and experimental studies on fabrication of two-layer aluminum-copper pipe by friction stir additive manufacturing. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2021 Dec 1;31(12):3643-58. doi: 10.1016/S1003-6326(21)65754-0
- [9] Sharifabad SS, Derazkola HA, Esfandyar M, Elyasi M, Khodabakhshi F. Mechanical properties of HA@ Ag/PLA nanocomposite structures prepared by extrusion-based additive manufacturing. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2021 Jun 1;118:104455. doi: 10.1016/j.jmbbm.2021.104455
- [10] Khoram D, Elyasi M, Derazkola HA, Mirnia MJ. Effects of shear bond on quality of Friction stir additive manufactured copper. *Materials Letters*. 2023 Dec 1;352:135153. doi: 10.1016/j.matlet.2023.135153
- [11] Naqibi MF, Elyasi M, Aval HJ, Mirnia MJ. Statistical modeling and optimization of two-layer aluminum-copper pipe fabrication by friction stir welding. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2022 Mar;75(3):635-51. doi: 10.1007/s12666-021-02453-w
- [12] Ivanaki MK, Entezarian MM. Experimental investigation of mechanical and metallurgical properties in friction stir spot welding of dissimilar AA6061-T6 to copper. *Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Jun 1;19(2):057-66.
- [13] Ivanaki MK, Afshari D, Poursaeidi E. Effects of friction stir welding of 6061-T6 To 5083-H11 aluminum alloys reinforced with Al₂O₃ on microstructure, hardness, and wear resistance. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2026 Feb;27(2):667-79. doi: 10.1007/s12541-025-01311-9
- [14] Karimi Ivanaki M, Afshari D, Seidi H. Investigation the effect of bobbin tool geometry in friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2019 Sep 23;6(4):1-6. [In Persian]
- [15] Entezarian MM, Karimi Ivanaki M, Afshari D. Optimization of friction stir spot welding parameters of AA6061/Al₂O₃ using response surface methodology. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Oct 22;11(8):43-50. doi: 10.22034/ijme.2024.470738.1992 [In Persian]
- [16] Mohammed Nafea AA, Elyasi M, Aghajani Derazkola H. Implementation of external magnetic field to improve strength of St37 steel resistance spot weld. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024 Aug;133(11):5319-31. doi: 10.1007/s00170-024-14076-8
- [17] Mohammed-Nafea AA, Elyasi M, Derazkola HA. Magnetically assisted resistance spot welding: a comprehensive review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025 Apr;137(9):4401-34. doi: 10.1007/s00170-025-15516-9
- [18] Roodgari MR, Jamaati R, Aval HJ. Fabrication of a 2-layer laminated steel composite by friction stir additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020 Mar 1;51:110-21. doi: 10.1016/j.jmapro.2019.11.005

- [19] Srivastava M, Rathee S. Microstructural and microhardness study on fabrication of Al 5059/SiC composite component via a novel route of friction stir additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*. 2021 Jan 1;39:1775-80. doi: [10.1016/j.matpr.2021.05.261](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.261)
- [20] Jiang T, Jiao T, Dai G, Shen Z, Guo Y, Sun Z, Li W. Microstructure evolution and mechanical properties of 2060 Al-Li alloy via friction stir additive manufacturing. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023 Feb 15;935:168019. doi: [10.1016/j.jallcom.2022.168019](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168019)
- [21] Perry ME, Griffiths RJ, Garcia D, Sietins JM, Zhu Y, Yu HZ. Morphological and microstructural investigation of the non-planar interface formed in solid-state metal additive manufacturing by additive friction stir deposition. *Additive Manufacturing*. 2020 Oct 1;35:101293. doi: [10.1016/j.addma.2020.101293](https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101293)
- [22] John Samuel Dilip J, Kalid Rafi H, Janaki Ram GD. A new additive manufacturing process based on friction deposition. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2011 Feb;64(1):27. doi: [10.1007/s12633-010-0078-z](https://doi.org/10.1007/s12633-010-0078-z)
- [23] Choudhury S, Acharya U, Roy J, Roy BS. Recent progress in solid-state additive manufacturing technique: Friction stir additive manufacturing. *Proceedings of the Institution of mechanical engineers, part E: Journal of process mechanical engineering*. 2023 Apr;237(2):467-91. doi: [10.1177/09544089221107755](https://doi.org/10.1177/09544089221107755)
- [24] Palanivel S, Nelaturu P, Glass B, Mishra RS. Friction stir additive manufacturing for high structural performance through microstructural control in an Mg based WE43 alloy. *Materials & Design (1980-2015)*. 2015 Jan 1;65:934-52. doi: [10.1016/j.matdes.2015.08.050](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.050)
- [25] Derazkola HA, Khodabakhshi F, Simchi A. Evaluation of a polymer-steel laminated sheet composite structure produced by friction stir additive manufacturing (FSAM) technology. *Polymer Testing*. 2020 Oct 1;90:106690. doi: [10.1016/j.polymertesting.2020.106690](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106690)
- [26] He C, Li Y, Zhang Z, Wei J, Zhao X. Investigation on microstructural evolution and property variation along building direction in friction stir additive manufactured Al-Zn-Mg alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2020 Mar 10;777:139035. doi: [10.1016/j.msea.2020.139035](https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139035)
- [27] Azarsa E, Mostafapour A. On the feasibility of producing polymer-metal composites via novel variant of friction stir processing. *Journal of Manufacturing Processes*. 2013 Oct 1;15(4):682-8. doi: [10.1016/j.jmapro.2013.01.010](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.01.010)
- [28] Wang W, Han P, Wang Y, Zhang T, Peng P, Qiao K, Wang Z, Liu Z, Wang K. High-performance bulk pure Al prepared through cold spray-friction stir processing composite additive manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020 Jul 1;9(4):9073-9. doi: [10.1016/j.jmrt.2020.08.060](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.060)
- [29] Mukhopadhyay A, Saha P. Mechanical and microstructural characterization of aluminium powder deposit made by friction stir based additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020 Jul 1;281:116648. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2020.116648](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116648)
- [30] ASTM B209/B209M-21: Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2021.
- [31] ASTM A681-08(2015): Standard Specification for Tool Steels Alloy. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2015.
- [32] Xiao Y, Li Y, Shi L, Wu C, Liu H, Sun Z. Experimental and numerical analysis of friction stir additive manufacturing of 2024 aluminium alloy. *Materials Today Communications*. 2023 Jun 1;35:105639. doi: [10.1016/j.mtcomm.2023.105639](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105639)
- [33] Beygi R, Zarezadeh Mehrizi M, Akhavan-Safar A, Mohammadi S, da Silva LF. A parametric study on the effect of FSW parameters and the tool geometry on the tensile strength of AA2024-AA7075 joints: microstructure and fracture. *Lubricants*. 2023 Jan 31;11(2):59. doi: [10.3390/lubricants11020059](https://doi.org/10.3390/lubricants11020059)
- [34] Gaafer AM, Mahmoud TS, Mansour EH. Microstructural and mechanical characteristics of AA7020-O Al plates joined by friction stir welding. *Materials Science and Engineering: A*. 2010 Oct 25;527(27-28):7424-9. doi: [10.1016/j.msea.2010.04.009](https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.04.009)
- [35] Kolhatkar AV, Karthik V, Divakar R, Kumar A, Joseph J. Development of Ultra Sub-size Tensile Specimen for Evaluation of Tensile Properties of Irradiated Materials. In *International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17)*. Programme and Papers 2017 Jan 1 (No. IAEA-CN--245, pp. 8-8).
- [36] Vairis A, Petousis M, Mountakis N, Tsarouchidou C, Vidakis N. The effect of tool geometry on the strength of FSW aluminum thin sheets. *Materials*. 2022 Nov 18;15(22):8187. doi: [10.3390/ma15228187](https://doi.org/10.3390/ma15228187)
- [37] Srivastava AK, Kumar N, Dixit AR. Friction stir additive manufacturing—An innovative tool to enhance mechanical and microstructural properties. *Materials Science and Engineering: B*. 2021 Jan 1;263:114832. doi: [10.1016/j.jmrt.2015.03.007](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.03.007)