



تحلیل تجربی تأثیر پارامترهای فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر استحکام، مدول الاستیک و سختی آلومینیوم ۷۰۷۵ با روش تاگوچی

عارف سلیمی‌نیا، ولی‌اله پناهی‌زاده*، محمد حسین‌پور

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: v.panahizadeh@sru.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۴
پذیرش: ۸ شهریور ۱۴۰۴

کلیدواژگان:

فرایند اصطکاکی اغتشاشی
آلومینیوم ۷۰۷۵
استحکام
سختی
مدول الاستیک

چکیده

آلومینیوم ۷۰۷۵ در صنایع با تکنولوژی بالا مثل ساخت بدنه و بال هواپیما مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله به بررسی تجربی و آماری تأثیر پارامترهای فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر خواص مکانیکی آلومینیوم ۷۰۷۵ پرداخته شده است. جهت کاهش تعداد آزمایش‌ها، از بین روش‌های مختلف طراحی آزمایش از روش تاگوچی استفاده گردید. برای تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی از روش نسبت سیگنال به نویز و آنالیز واریانس کمک گرفته شده است. سرعت دورانی، پیشروی، شکل ابزار و تعداد پاس انجام فرایند به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده است. خواص مکانیکی آلومینیوم ۷۰۷۵ شامل سختی، استحکام و مدول الاستیک نیز به عنوان پارامترهای خروجی آزمایش‌های تجربی مورد بحث و بررسی قرار گرفتند. بنابر نتایج به دست آمده پارامترهای فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر میزان تغییر شکل پلاستیک و دمای ورودی مؤثر می‌باشند. افزایش پیشروی و کاهش سرعت دورانی به کاهش دمای ورودی منجر می‌شود. کاهش دما در فرایند اصطکاکی اغتشاشی جلوگیری از رشد اندازه دانه‌ها را به دنبال دارد. با افزایش اندازه دانه خواص مکانیکی مانند سختی تقلیل می‌یابد. پیشروی با میزان تأثیر ۵۵/۲۲ درصد مؤثرترین پارامتر بر میزان سختی آلومینیوم ۷۰۷۵ می‌باشد. افزایش پیشروی علاوه بر تأثیر مثبت بر افزایش سختی منجر به بهبود استحکام نیز می‌شود. کاهش سرعت دورانی و به دنبال آن کاهش دمای ورودی دلیل افزایش خواص مکانیکی آلومینیوم سری ۷۰۷۵ می‌باشد. پیشروی و سرعت دورانی به ترتیب با ۳۲/۷۵ و ۹/۸۹ درصد بیشترین و کمترین تأثیر را بر استحکام دارند.

Experimental analysis of the effect of friction stir process parameters on the mechanical properties of 7075 aluminum using the Taguchi method

Aref Saliminia, Valiollah Panahizadeh*, Mohammad Hoseinpour

Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: v.panahizadeh@sru.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 5 May 2025

Accepted: 30 August 2025

Keywords:

Friction Stir Process

Aluminum 7075

Strength

Hardness

Elastic Modulus

Abstract

Aluminum 7075 is used in high-tech industries such as aircraft fuselages and wings. In this paper, the effect of friction stir process parameters on the mechanical properties of 7075 aluminum has been experimentally and statistically investigated. In order to reduce the number of experiments, Taguchi method was used among the different experimental design methods. Signal-to-noise ratio and analysis of variance methods were used to analyze the results of the experimental experiments. Rotational speed, traverse speed, tool shape, and number of process passes were considered as input parameters. Mechanical properties of 7075 aluminum, including hardness, strength, and elastic modulus, were also discussed and investigated as output parameters of the experimental experiments. According to the results obtained, friction stir process parameters are effective on the amount of plastic deformation and input temperature. Increasing traverse speed and decreasing rotational speed leads to a decrease in input temperature. Reducing temperature in friction stir process prevents grain size growth. With increasing grain size, mechanical properties such as hardness are reduced. The traverse speed is the most effective parameter on the hardness of 7075 aluminum with an effect of 55.22%. In addition to the positive effect on increasing hardness, increasing the traverse speed also leads to improved strength. The reduction in rotational speed and subsequent reduction in inlet temperature are the reasons for the increase in mechanical properties of 7075 series aluminum. Traverse speed and rotational speed have the highest and lowest effects on strength with 32.75 and 9.89 percent, respectively.

Please cite this article using:

Saliminia A, Panahizadeh V, Hoseinpour M. Experimental analysis of the effect of friction stir process parameters on the mechanical properties of 7075 aluminum using the Taguchi method. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Aug 23;12(6):42-56. doi: 10.22034/ijme.2025.516987.2071 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

فلزات سبک در ساخت محصولات مورد نیاز صنایع به‌وفور مورد استفاده قرار می‌گیرند. در بین فلزات سبک آلومینیوم از جمله فلزاتی است که کاربرد زیادی در صنایع مختلف دارد. از خواص مکانیکی و فیزیکی عالی آلیاژ آلومینیوم می‌توان به استحکام بالا، مقاومت در برابر خوردگی عالی، چگالی کم و پایداری حرارتی مناسب اشاره کرد [۱]. آلومینیوم به دلیل داشتن خواص مناسب در صنایع متعددی از قبیل صنعت نظامی، خودروسازی و هوافضا استفاده می‌شود [۲]. آلومینیوم آلیاژ ۷۰۷۵ به طور گسترده در سازه‌های هواپیما مانند بدنه و بال استفاده می‌شود. همچنین در زمینه‌های دیگر مثل قطعات دوچرخه، ابزار صخره‌نوردی، تجهیزات تیراندازی با کمان و سلاح گرم استفاده می‌گردد. طراح به دنبال مصالح سبک و استحکام بالا برای کاربردهای سازه‌ای می‌باشند. این فلز به خاطر دارا بودن ویژگی‌هایی همچون، استحکام بالا، وزن سبک، دسترسی آسان و مقاومت در برابر خوردگی قابل قبول به عنوان جایگزین مناسبی برای فولادها تلقی می‌شود [۳]. با این حال، ویژگی‌های سطح ضعیف مانند مقاومت در برابر سایش در برخی موارد کاربرد گسترده آن‌ها را محدود می‌کند [۴]. از جمله روش‌هایی که جهت بهبود برخی خواص آلومینیوم به کار گرفته می‌شود، می‌توان به تکنیک تغییر شکل پلاستیک شدید^۱ (SPD) اشاره کرد. فرایند اصطکاکی اغتشاشی^۲ (FSP) از جمله روش‌های نوین تغییر شکل پلاستیک شدید است که به این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرایند اصطکاکی اغتشاشی یک فناوری جدید و پیچیده حالت جامد است. این فرایند بر اساس اصول ذهنی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۳ (FSW) طراحی شده است. در این روش فشار و حرارت حاصل از حرکت و اصطکاک ابزار، تغییر شکل پلاستیک شدید و تغییرات موضعی ایجاد می‌کند. کیفیت و سرعت تولید مناسب، سازگاری با محیط زیست، عدم نیاز به مواد افزودنی، امکان اتصال دو نوع جنس متفاوت، سادگی و ارزانی فرایند، بهبود خواص مکانیکی و ساختار میکروسکوپی از جمله مزایای فرایند اصطکاکی اغتشاشی محسوب می‌شوند. در تکنیک اصطکاکی اغتشاشی از یک ابزار غیر مصرفی با یک شانه و پین استفاده می‌شود. شانه به مواد فشار وارد می‌کند، در حالی که پین گرداب چرخشی ایجاد می‌کند که باعث تغییر شکل پلاستیک و اصطکاک شدید می‌شود [۵]. میزان تغییرات موضعی حاصل از این روش به پارامترهایی مانند سرعت دورانی، پیشروی، زاویه ورود ابزار، تعداد پاس و شکل پین ابزار غیر مصرفی وابسته است [۶]. طبق رابطه هال پچ خواص مکانیکی مواد به اندازه دانه‌ها بستگی دارد [۷]. دانه‌های ریزتر بهبود خواص مکانیکی را به دنبال دارند و با رشد اندازه دانه خواص مکانیکی تقلیل می‌یابد. بهبود مدول الاستیک در فرایند اصطکاکی اغتشاشی به واسطه کاهش اندازه دانه‌ها و تغییر در ریز ساختار است [۸].

آداتلا و آکینلابی [۹] به مقایسه تأثیر تعداد پاس در فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر استحکام و سختی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ پرداختند. آن‌ها نشان دادند که افزایش تعداد پاس در فرایند اصطکاکی اغتشاشی بهبود قابل توجهی در سختی و استحکام را به دنبال دارد. نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از بهبود ۶۲ درصدی سختی بعد از انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی نسبت به فلز پایه است. آن‌ها دلیل بهبود خواص مکانیکی را کاهش عیوب و اندازه دانه‌ها دانستند. آن‌ها بیان کردند که مطابق قانون هال پچ با کاهش سایز دانه‌ها سختی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ افزایش می‌یابد.

شارما و همکاران [۱۰] به بررسی اثر سرعت دورانی و پیشروی بر سختی و استحکام آلومینیوم ۷۰۷۵ در فرایند اصطکاکی اغتشاشی پرداختند. آن‌ها بیان کردند که افزایش سرعت دورانی و پیشروی تا حد معینی باعث افزایش سختی و استحکام می‌شود و پس از آن حد مشخص، خواص مکانیکی روند کاهشی طی می‌کند. مهمترین پارامتر مؤثر بر خواص مکانیکی در بین پارامترهای فرایند اصطکاکی اغتشاشی را سرعت دورانی معرفی کردند. کومار و کومار [۱۱] تأثیر پارامترهای سرعت دورانی، تعداد پاس و پیشروی بر استحکام و سختی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ را در فرایند اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار دادند. بهبود سختی و استحکام آلومینیوم ۷۰۷۵ با افزایش پیشروی و تعداد پاس و کاهش سرعت دورانی از نتایج تحقیقات آن‌ها می‌باشد. آن‌ها گزارش کردند که به علت حرارت بیشتر و رشد اندازه دانه‌ها با افزایش سرعت دورانی، استحکام و سختی قطعه کار کاهش می‌یابد. جایکواد و چینچانیکار [۱۲] اثر نوع شکل پین ابزار بر سختی و استحکام آلومینیوم ۷۰۷۵ در فرایند اصطکاکی اغتشاشی را بررسی کردند. آن‌ها دو شکل ابزار مخروطی ساده و مخروطی رزوه شده را مورد استفاده قرار دادند و بهبود سختی و استحکام قطعه کار آلومینیومی را هنگام استفاده از ابزار مخروطی رزوه شده در مقایسه با ابزار مخروطی ساده مشاهده نمودند. دلیل افزایش استحکام و سختی توسط ابزار مخروطی رزوه شده

¹ Severe Plastic Deformation

² Friction Stir Processing

³ Friction Stir Welding

را توانایی بهتر هم زدن و به دنبال آن تغییر شکل پلاستیک بیشتر، عیوب کمتر، دانه‌های ریزتر و توزیع همگن دانه‌ها بیان کردند. حمودی و دهاهیر [۱۳] میزان تأثیر سرعت دورانی و پیشروی بر نرخ سایش، استحکام و سختی در فرایند اصطکاکی اغتشاشی را مورد تحقیق و پژوهش قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش پیشروی مقدار سختی و مقاومت به سایش آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ افزایش می‌یابد و افزایش سرعت دورانی باعث کاهش استحکام می‌شود. دلیل بهبود مقاومت به سایش را شکل‌گیری دانه‌های ریز به علت تبلور مجدد دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک شدید دانستند.

فرایند اصطکاکی اغتشاشی دارای پارامترهای مختلفی است. زاویه ورود، سرعت دورانی، پیشروی، تعداد پاس و شکل ابزار از جمله پارامترهای مؤثر بر این فرایند می‌باشند. نحوه تأثیر پارامترها با هم متفاوت است. همچنین برخی پارامترها رفتار دوگانه از خود نشان می‌دهند. برخی پژوهش‌ها افزایش پیشروی را باعث بهبود خروجی و برخی نیز نتیجه معکوس را گزارش داده‌اند. یکی دیگر از چالش‌های فرایند اصطکاکی اغتشاشی تعیین پارامترهای بهینه برای بدست آوردن بهترین خروجی فرایند است. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر پارامترهای فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر خواص مکانیکی آلومینیوم ۷۰۷۵ با روش تاگوچی است. سرعت دورانی، پیشروی، تعداد پاس و شکل ابزار به عنوان پارامترهای مؤثر فرایند اصطکاکی اغتشاشی انتخاب و تأثیر آن‌ها بر استحکام کششی، مدول الاستیک و سختی به صورت تجربی و آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

۲- روش انجام آزمایش

قطعه‌کار استفاده شده در این پژوهش، آلومینیوم سری ۷۰۷۵ است که خواص آن در جدول ۱ ارائه شده است. آلومینیوم سری ۷۰۰۰ یکی از رایج‌ترین نوع آلیاژهای آلومینیوم است که در بین آن‌ها سری ۷۰۷۵ کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف دارد. در آلومینیوم سری ۷۰۷۵ عنصر روی نقش اصلی را بازی می‌کند. آزمایش کوانتومتری در سه نقطه مختلف از سطح نمونه انجام و میانگین آن‌ها به‌عنوان ترکیب شیمیایی قطعه‌کار در نظر گرفته شده است. جدول ۲ ترکیب شیمیایی آلومینیوم سری ۷۰۷۵ مورد استفاده را نشان می‌دهد. جنس ابزار مورد استفاده با توجه به مقالات منتشر شده در زمینه فرایند اصطکاکی اغتشاشی از فولاد ابزار گرمکار H13 انتخاب شده است.

جدول ۱ خواص آلومینیوم ۷۰۷۵ [۱۴]

پارامتر	مقدار
نقطه ذوب (°C)	۶۳۵-۴۷۷
چگالی (g/cm ³)	۲/۸۱
مدول الاستیک (GPa)	۷۰
استحکام تسلیم (MPa)	۷۹
استحکام کششی (MPa)	۱۴۹
هدایت حرارتی (W m ⁻¹)	۱۳۰

جدول ۲ ترکیب شیمیایی آلومینیوم ۷۰۷۵

عنصر	مقدار
روی	۵/۲۳
آهن	۰/۳۳۸
مس	۱/۴۶
منگنز	۰/۰۸۷
منیزیم	۲/۴۹
سیلیسیم	۰/۰۷۲
کروم	۰/۲۳۷
تیتانیوم	۰/۰۲۶
آلومینیوم	۹۰/۰۳

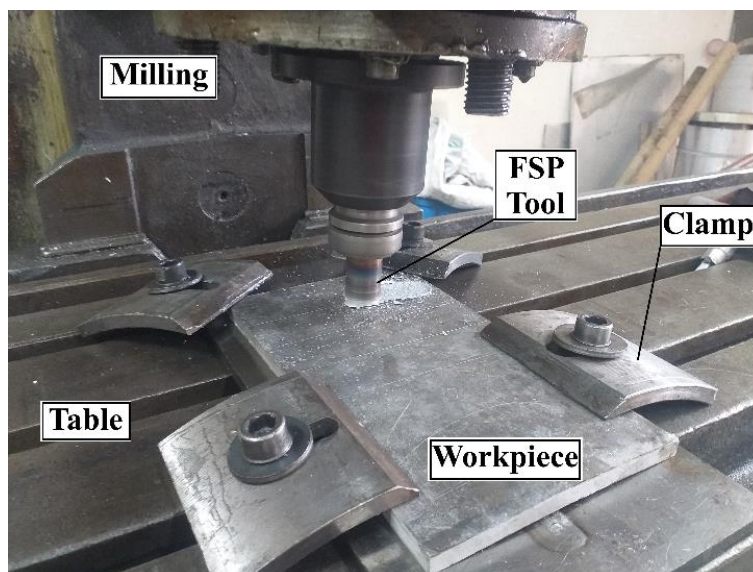
فرایند اصطکاکی اغتشاشی دارای پارامترهای مؤثر متعددی است. سرعت دورانی، میزان پیشروی، تعداد پاس و شکل ابزار پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش است. سطوح پارامترهای مورد استفاده در فرایند اصطکاکی اغتشاشی در هر یک از آزمایش‌های تجربی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳ پارامترهای فرایند اصطکاکی اغتشاشی

پارامتر	مقدار
سرعت دورانی (rpm)	۶۳۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰
پیشروی (mm/min)	۴۰، ۶۰، ۸۰
تعداد پاس	۱، ۲
شکل ابزار	گرد، مربع، مخروطی رزوه شده
زاویه ورود	۳ درجه

از نرم افزار مینیتی‌تب برای طراحی آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج حاصل استفاده شده است. از آنالیز واریانس می‌توان برای بررسی تأثیر یک یا چند متغیر ورودی بر یک عامل خروجی یا پاسخ استفاده کرد. در پژوهش حاضر از آنالیز واریانس برای بررسی میزان تأثیر سرعت دورانی، پیشروی، تعداد پاس و شکل ابزار بر سختی، استحکام کششی و مدول الاستیک آلومینیوم سری ۷۰۷۵ مورد استفاده قرار گرفته است. روش تاگوچی از جمله روش‌های مختلف طراحی آزمایش محسوب می‌شود. از روش طراحی آزمایش تاگوچی جهت کاهش تعداد آزمایش‌های تجربی مورد نیاز استفاده شده است. از مزایای روش تاگوچی می‌توان به کاهش تعداد آزمایش‌ها در نتیجه کاهش هزینه و زمان آزمایش، قابلیت بررسی اثرات مجزا و متقابل پارامترها و پیش بینی پاسخ بهینه اشاره کرد. دستگاه به کار رفته برای انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی دستگاه فرز BK63 ساخت شرکت هرکت رومانی می‌باشد. پارامترهای مورد استفاده با توجه به مقالات منتشر شده و امکانات کارگاهی موجود انتخاب گردید. پارامترهای سرعت دورانی، پیشروی و شکل ابزار دارای ۳ سطح و پارامتر تعداد پاس ۲ سطحی در نظر گرفته شده است. با توجه به پژوهش‌های انجام شده در زمینه فرایند اصطکاکی اغتشاشی پارامتر زاویه ورود ثابت و تک سطحی انتخاب گردید. جدول ۴ طراحی آزمایش تاگوچی و سطوح مورد استفاده هر پارامتر را نشان می‌دهد.

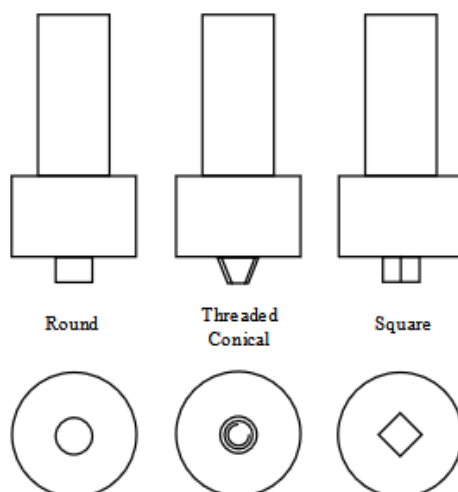
شکل ۱ دستگاه فرز و تجهیزات جانبی مورد استفاده در فرایند اصطکاکی اغتشاشی را نشان می‌دهد. شماتیک ابزارهای مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۱ تجهیزات جانبی مورد استفاده در فرایند اصطکاکی اغتشاشی

جدول ۴ طراحی آزمایش تاگوچی و سطوح مورد استفاده هر پارامتر در آزمایش‌های تجربی

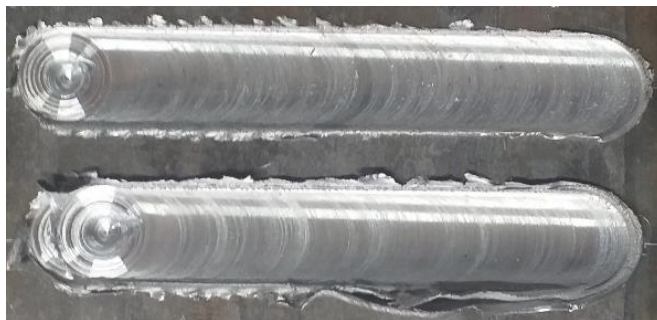
مرحله	تعداد پاس	پیشروی	سرعت دورانی	شکل ابزار	استحکام (MPa)	سختی (HRA)	مدول (GPa)
۱	۱	۴۰	۶۳۰	مخروطی رزوه شده	۱۹۴/۱۹	۴۷	۶۹/۵۲
۲	۱	۴۰	۱۰۰۰	گرد	۱۴۵/۲۶	۴۵/۹	۵۵/۷۲
۳	۱	۴۰	۸۰۰	مربع	۱۹۲/۴۵	۴۴/۲	۶۵/۰۵
۴	۱	۸۰	۶۳۰	مخروطی رزوه شده	۲۱۸/۰۷	۵۰/۵	۶۷/۵۵
۵	۱	۸۰	۱۰۰۰	گرد	۱۸۵/۹۱	۴۹/۴	۶۴/۰۴
۶	۱	۸۰	۸۰۰	مربع	۲۱۶/۱۶	۴۹/۳	۶۶/۴۶
۷	۱	۶۰	۶۳۰	گرد	۲۰۹/۷۳	۵۰/۷	۶۳/۹۴
۸	۱	۶۰	۱۰۰۰	مربع	۱۹۹	۴۸/۲	۵۹/۳۴
۹	۱	۶۰	۸۰۰	مخروطی رزوه شده	۲۰۰/۶۹	۴۸/۶	۶۹/۲۶
۱۰	۲	۴۰	۶۳۰	مربع	۲۰۴/۸۴	۴۸/۸	۷۰/۵۲
۱۱	۲	۴۰	۱۰۰۰	مخروطی رزوه شده	۱۸۸/۵۴	۴۷/۵	۶۳/۸۵
۱۲	۲	۴۰	۸۰۰	گرد	۱۹۴/۳۰	۴۶/۴	۵۸/۴۴
۱۳	۲	۸۰	۶۳۰	گرد	۲۰۰/۲۷	۴۸/۶	۷۲/۶۸
۱۴	۲	۸۰	۱۰۰۰	مربع	۲۱۱/۱۴	۴۸	۶۰/۹۳
۱۵	۲	۸۰	۸۰۰	مخروطی رزوه شده	۲۲۱/۸۹	۵۱	۶۹/۰۷
۱۶	۲	۶۰	۶۳۰	مربع	۲۰۹/۲۹	۵۰/۶	۶۹/۷۸
۱۷	۲	۶۰	۱۰۰۰	مخروطی رزوه شده	۲۳۴/۸۴	۴۷/۱	۶۳/۶۲
۱۸	۲	۶۰	۸۰۰	گرد	۱۹۰/۲۳	۵۰/۲	۶۶/۵۳



شکل ۲ شماتیک ابزارهای مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی

بعد از انجام تست‌های تجربی به منظور آماده‌سازی نمونه‌های مورد نیاز جهت تست کشش با استفاده از دستگاه وایرکات نمونه‌های دمبلی شکل مطابق با استاندارد ASTM B557-14 تهیه شد. جهت اندازه‌گیری استحکام کششی از دستگاه کشش STM 150 ساخت شرکت سنتام استفاده شده است. سختی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سختی سنج مدل UV1 ساخت شرکت کوپا اندازه‌گیری شده

است. روش راکول A برای اندازه‌گیری سختی نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، از یک الماسه مخروطی شکل به عنوان فرورونده استفاده می‌شود و نیروی اولیه و اصلی به ترتیب با وزن‌های ۱۰ و ۶۰ کیلوگرم اعمال می‌شود. عدد سختی راکول A با استفاده از عمق فرورفتگی ایجاد شده توسط الماسه محاسبه می‌شود. قطعه‌کار و نمونه‌های تست کشش به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. برای تعیین رابطه‌ی یک یا چند متغیر مستقل (ورودی)، با متغیر وابسته (پاسخ) می‌توان از مدل‌سازی استفاده کرد. روش‌های مختلفی برای تعیین رابطه و اثر چندین متغیر ورودی بر متغیر پاسخ وجود دارد. در این مقاله از رگرسیون برای تعیین رابطه تعداد پاس، پیشروی، سرعت دورانی و شکل ابزار به‌عنوان متغیرهای ورودی با استحکام، سختی و مدول الاستیک به‌عنوان متغیر پاسخ (خروجی) استفاده شده است.



شکل ۳ نمونه‌های فرایند اصطکاکی اغتشاشی



شکل ۴ نمونه‌های تست کشش

۳- نتایج و بحث

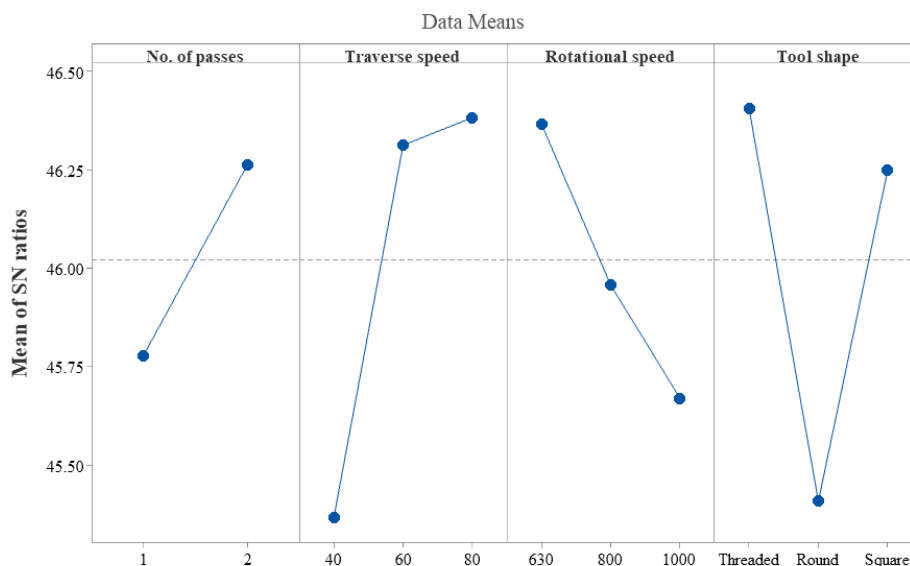
۳-۱- استحکام کششی

یک ماده برای به‌کارگیری در صنایع مختلف از نظر خواص مورد نیاز جهت برآورده ساختن خواسته‌های طراحان ارزیابی می‌شود. خواص مکانیکی از جمله خواصی است که در طراحی‌های مهندسی با توجه به شرایط کاری قطعه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. از مهمترین خواص مکانیکی می‌توان به استحکام ماده اشاره کرد. استحکام یک ماده به عوامل گوناگونی وابسته است. با انجام عملیات

ثانویه مانند تغییر شکل پلاستیک شدید یا عملیات حرارتی امکان تغییر در میزان استحکام ماده مورد نظر وجود دارد. در فرایند اصطکاکی اغتشاشی در اثر تغییر شکل پلاستیک شدید و حرارت ناشی از اصطکاک ابزار با فلز پایه، نیرو محرکه لازم جهت تبلور مجدد دینامیکی در ناحیه پردازش ایجاد می‌شود [۱۵]. تبلور مجدد دینامیکی در حین فرایند اصطکاکی اغتشاشی تغییر ریز ساختار و تولید دانه‌هایی با اندازه کوچکتر از دانه‌های فلز پایه را به دنبال دارد [۱۶]. پارامترهای فرایند اصطکاکی اغتشاشی مانند شکل ابزار، دمای قطعه‌کار و فشار محوری به طور قابل توجهی بر اندازه دانه‌های تبلور مجدد دینامیکی در منطقه پردازش تأثیر گذار می‌باشند [۱۷].

شکل ۵ نمودار نسبت سیگنال به نویز پارامترهای ورودی بر استحکام کششی آلومینیوم سری ۷۰۷۵ را نشان می‌دهد. با توجه به اهمیت افزایش استحکام از حالت "بیشتر بهتر" استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود با افزایش تعداد پاس استحکام افزایش یافته است. روند تغییرات استحکام با افزایش سرعت دورانی و کاهش پیشروی ابزار، کاهش پیشروی و دورانی و پیشروی متغیرهای اصلی تأثیرگذار در فرایند اصطکاکی اغتشاشی می‌باشند. این دو پارامتر بر میزان گرمای تولید شده و نرخ تغییر شکل مواد اثر می‌گذارند [۱۸]. با افزایش سرعت دورانی و کاهش پیشروی دمای ورودی فرایند افزایش می‌یابد [۱۹، ۲۰]. افزایش دما در حین فرایند، رشد اندازه دانه‌ها را به دنبال دارد. در نتیجه با افزایش سرعت دورانی و کاهش پیشروی، اندازه دانه‌ها افزایش و استحکام آلومینیوم سری ۷۰۷۵ کاهش می‌یابد. در فرایند اصطکاکی اغتشاشی هم گرمای ورودی و هم بارگذاری مکانیکی بر ریزساختار و متعاقباً خواص مکانیکی مؤثر می‌باشند [۲۱]. افزایش تعداد سطوح مسطح و وجود رزوه و شیار در ابزار می‌تواند به دلیل هم‌زدن بهتر، اختلاط بهتر مواد و کاهش عیوب در منطقه پردازش را به دنبال داشته باشد [۲۲]. با توجه به شکل پایین‌ترین استحکام مربوط به فرایند اصطکاکی اغتشاشی با ابزار گرد و بالاترین مربوط به فرایند اصطکاکی اغتشاشی با ابزار مخروطی رزوه شده می‌باشد. هم‌زدن بهتر، اختلاط و تغییر شکل پلاستیک بیشتر به همراه کاهش عیوب دلیل بهبود استحکام قطعه هنگام استفاده از ابزار مخروطی رزوه شده نسبت به ابزار مربعی شکل و گرد است. عمل هم‌زدن ابزار دانه‌های بزرگ‌تر را می‌شکند، دانه‌های جدید و کوچک‌تر در نتیجه تبلور مجدد دینامیکی تشکیل می‌گردد. تشکیل دانه‌های ریزتر منجر به افزایش تراکم مرزدانه می‌شود. از آنجایی که مرزدانه مانعی بر سر راه حرکت نابجایی‌ها است در نتیجه استحکام بهبود می‌یابد. روند مشاهده شده در مورد تأثیر پارامترهای ورودی بر استحکام کششی، با نتایج به دست آمده توسط سایر محققان [۲۳، ۲۴] مطابقت دارد.

Main Effects Plot for SN ratios



Signal-to-noise: Larger is better

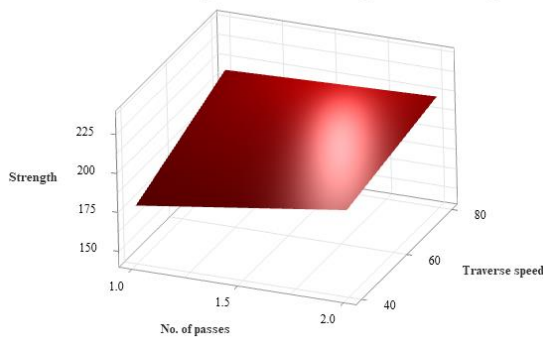
شکل ۵ نمودار نسبت سیگنال به نویز تأثیر پارامترهای ورودی بر استحکام

حالت بهینه برای دستیابی به بیشترین استحکام آلومینیوم سری ۷۰۷۵ عبارت است از: سرعت دورانی ۶۳۰ دور بر دقیقه، پیشروی ۸۰ میلی‌متر بر دقیقه، ۲ پاس انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از ابزار مخروطی رزوه شده. در شکل ۶ نمودار سطح

اثر متقابل پارامترهای ورودی بر استحکام ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۶-الف مشخص است افزایش همزمان پیشروی و کاهش سرعت برشی منجر به افزایش استحکام قطعه‌کار می‌شود. با توجه به شکل ۶-ت استحکام قطعه‌کار با افزایش تعداد پاس در هر شکل ابزار روند افزایشی از خود نشان می‌دهد. بیشترین استحکام مربوط به ۲ پاس انجام در فرایند اصطکاکی اغتشاشی ب ابزار مخروطی رزوه شده می‌باشد. جدول ۵ آنالیز واریانس برای استحکام را نشان می‌دهد. در جدول ۵ میزان تأثیر سرعت دورانی، پیشروی، تعداد پاس و شکل ابزار بر استحکام آلومینیوم ۷۰۷۵ به ترتیب ۹/۸۹، ۳۲/۷۵، ۱۰/۴۷ و ۲۹/۳۷ درصد است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در فرایند اصطکاکی اغتشاشی بیشترین تأثیر را پیشروی و کمترین تأثیر را سرعت دورانی بر استحکام کششی آلومینیوم سری ۷۰۷۵ دارد. برای تعیین رابطه سرعت دورانی، پیشروی، تعداد پاس و شکل ابزار به‌عنوان متغیرهای مستقل با استحکام به‌عنوان متغیر وابسته و پاسخ از رگرسیون استفاده شده است. در معادله ۱ مدل رگرسیون برای استحکام نشان داده شده است.

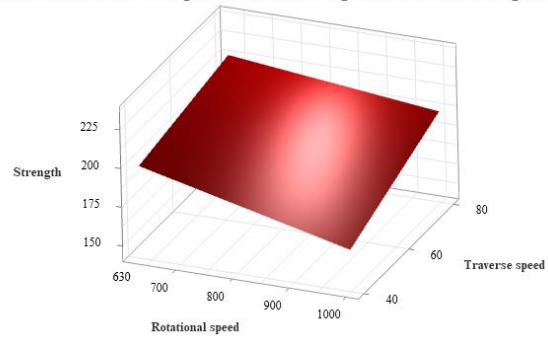
$$Strength = 182.8 + 9.83 \text{ No. of passes} + 0.535 \text{ Traverse speed} - 0.0317 \text{ Rotational speed} - 1.66 \text{ Tool shape} \quad (1)$$

Surface Plot of Strength vs Traverse speed, No. of passes



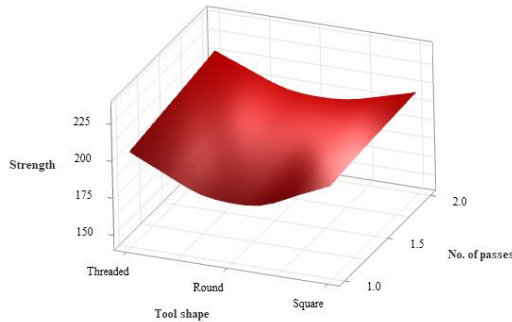
(ب)

Surface Plot of Strength vs Traverse speed, Rotational speed



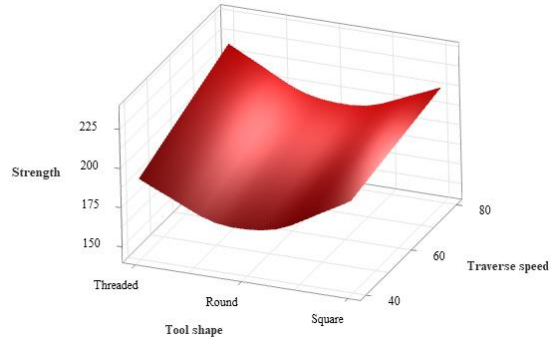
(الف)

Surface Plot of Strength vs No. of passes, Tool shape



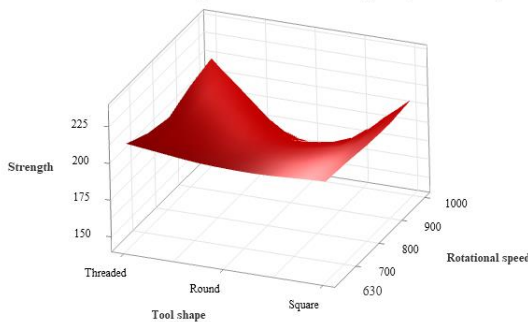
(ت)

Surface Plot of Strength vs Traverse speed, Tool shape



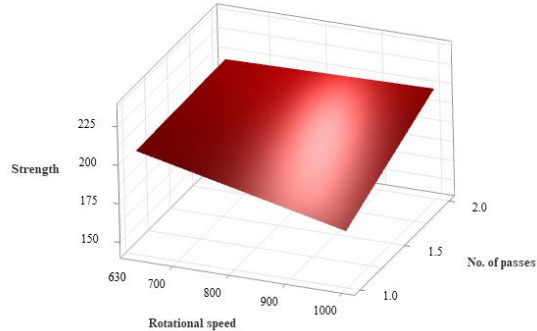
(پ)

Surface Plot of Strength vs Rotational speed, Tool shape



(ج)

Surface Plot of Strength vs No. of passes, Rotational speed



(ث)

شکل ۶ نمودار سطح اثر متقابل پارامترهای ورودی بر استحکام الف) اثر متقابل سرعت دورانی و پیشروی، ب) اثر متقابل تعداد پاس و پیشروی، پ) اثر متقابل شکل ابزار و پیشروی، ت) اثر متقابل تعداد پاس و سرعت دورانی، ج) اثر متقابل شکل ابزار و سرعت دورانی

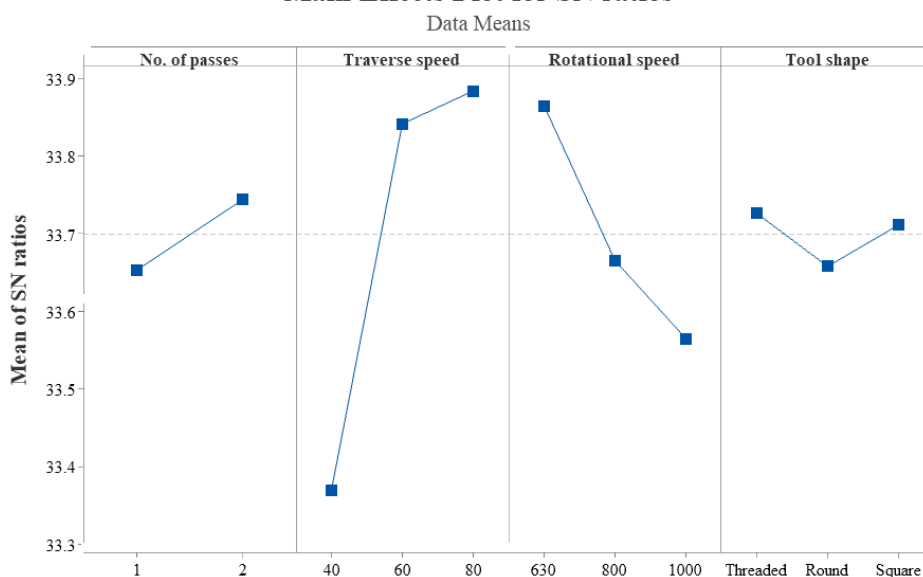
جدول ۵ آنالیز واریانس برای استحکام آلومینیوم ۷۰۷۵

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	درصد تأثیر
تعداد پاس	۱	۲۹۷۳۰۹۳	۲۹۷۳۰۹۳	۱۰/۴۷
پیشروی	۲	۹۲۹۹۷۸۹	۴۶۴۹۸۹۴	۳۲/۷۵
سرعت دورانی	۲	۲۸۰۸۳۹۴	۱۴۰۴۱۹۷	۹/۸۹
شکل ابزار	۲	۸۳۳۹۹۹۴	۴۱۶۹۹۹۷	۲۹/۳۷
خطا	۱۰	۴۹۷۵۰۳۲	۴۹۷۵۰۳	۱۷/۵۲
مجموع	۱۷	۲۸۹۶۳۰۲		۱۰۰

۳-۲- سختی

یکی دیگر از مهمترین خواص مکانیکی که در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرد سختی است. در واقع سختی مقاومت سطوح مواد در برابر نفوذ اجسام سخت‌تر را نشان می‌دهد. سختی قطعه‌کار به عنوان یکی از متغیرهای خروجی فرایند اصطکاکی اغتشاشی، تأثیر بسزایی بر عملکرد محصول مورد نظر دارد. در شکل ۵ نمودار نسبت سیگنال به نویز اثر پارامترهای ورودی بر سختی نشان داده شده است. با توجه به اهمیت افزایش سختی قطعه‌کار، از حالت "بیشتر بهتر" مورد استفاده قرار گرفته است. مطابق شکل ۷ با افزایش تعداد پاس، روند تغییر سختی افزایشی است. افزایش تعداد پاس، تغییر شکل پلاستیک بیشتر و دانه‌های ریزتر را به دنبال دارد که منجر به بهبود سختی می‌شود. افزایش پیشروی از ۴۰ تا ۸۰ میلی‌متر بر دقیقه باعث افزایش میزان سختی آلومینیوم سری ۷۰۷۵ می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سختی قطعه‌کار با افزایش سرعت دورانی کاهش می‌یابد. اندازه دانه‌ها به شدت به گرمای تولید شده وابسته است. از آنجایی که افزایش سرعت دورانی و کاهش پیشروی منجر به افزایش دمای ورودی می‌شود کاهش سرعت دورانی و افزایش پیشروی از رشد اندازه دانه‌ها جلوگیری می‌کند. دانه‌های ریزتر حاصل از کاهش سرعت دورانی و افزایش پیشروی دلیل افزایش سختی آلومینیوم ۷۰۷۵ می‌باشد. با توجه شکل سختی مربوط به فرایند اصطکاکی اغتشاشی با ابزار گرد کمتر از ابزار مربعی شکل و ابزار مخروطی رزوه شده می‌باشد. ابزار گرد به خاطر ویژگی‌های ساختاری خود توانایی هم زدن و اختلاط کمتری نسبت به دو شکل دیگر دارد. در نتیجه مقدار سختی قطعه به دلیل اختلاط کمتر و اندازه دانه‌های بزرگتر در پایین‌ترین سطح قرار می‌گیرد. فرایند اصطکاکی اغتشاشی با ابزار مخروطی رزوه شده سختی بیشتری نسبت دو ابزار دیگر ارائه می‌دهد.

Main Effects Plot for SN ratios

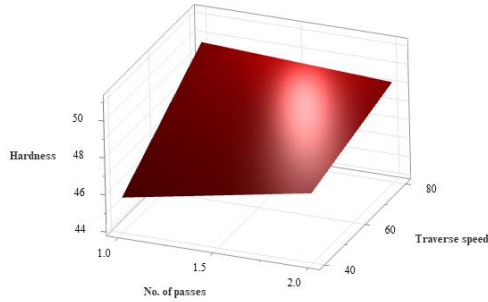


Signal-to-noise: Larger is better

شکل ۷ نمودار نسبت سیگنال به نویز تأثیر پارامترهای ورودی بر سختی

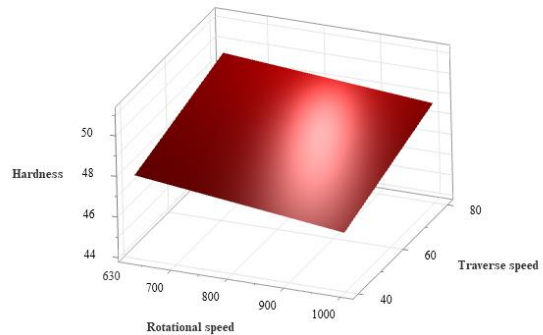
روند مشاهده شده در مورد تأثیر پارامترهای ورودی بر سختی، با نتایج به دست آمده توسط سایر محققان [۲۶، ۲۵] مطابقت دارد. در فرایند اصطکاکی اغتشاشی حالت بهینه برای دستیابی به بیشترین سختی عبارت است از: ۲ پاس انجام فرایند، سرعت دورانی ۶۳۰ دور بر دقیقه، پیشروی ۸۰ میلی‌متر بر دقیقه و انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی با ابزار مخروطی رزوه شده. شکل ۸ نمودار سطح اثر متقابل پارامترهای ورودی بر سختی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸-ب سختی قطعه‌کار در تمامی پاس‌ها با افزایش پیشروی روند افزایشی دارد. کمترین میزان سختی در پیشروی ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه و انجام فرایند در ۱ پاس مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۸-ث کاهش هم‌زمان سرعت دورانی و افزایش تعداد پاس موجب افزایش سختی قطعه‌کار می‌شود.

Surface Plot of Hardness vs Traverse speed, No. of passes



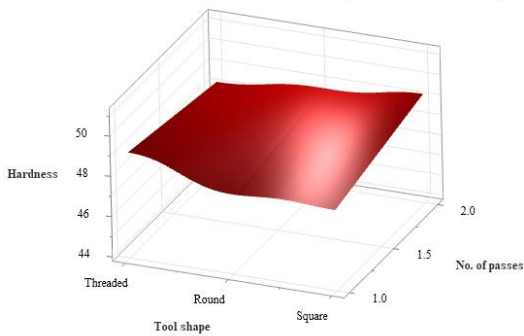
(ب)

Surface Plot of Hardness vs Traverse speed, Rotational speed



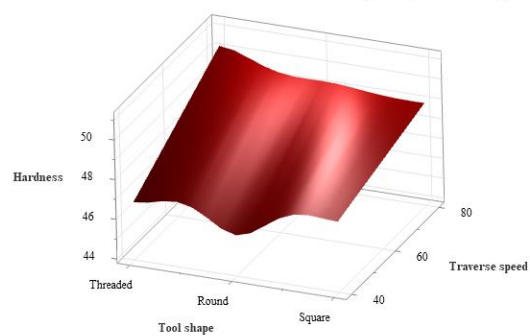
(الف)

Surface Plot of Hardness vs No. of passes, Tool shape



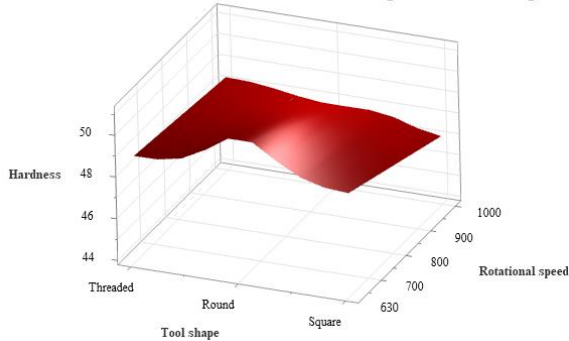
(ت)

Surface Plot of Hardness vs Traverse speed, Tool shape



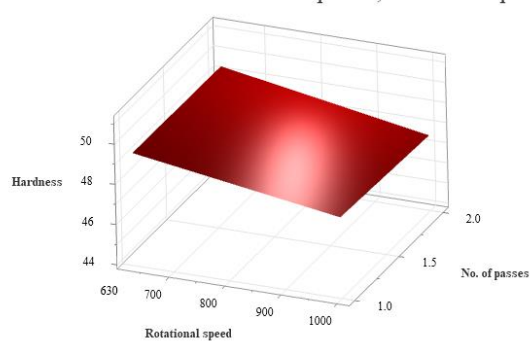
(پ)

Surface Plot of Hardness vs Rotational speed, Tool shape



(ج)

Surface Plot of Hardness vs No. of passes, Rotational speed



(ث)

شکل ۸ نمودار سطح اثر متقابل پارامترهای ورودی بر سختی الف) اثر متقابل سرعت دورانی و پیشروی، ب) اثر متقابل تعداد پاس و پیشروی، پ) اثر متقابل شکل ابزار و پیشروی، ت) اثر متقابل تعداد پاس و شکل ابزار، ث) اثر متقابل تعداد پاس و سرعت دورانی، ج) اثر متقابل شکل ابزار و سرعت دورانی

جدول ۶ آنالیز واریانس برای سختی را نشان می‌دهد. مطابق جدول ۶ تعداد پاس، سرعت دورانی، پیشروی و شکل ابزار به ترتیب ۶/۸۲، ۱۹/۷۸، ۵۵/۲۲ و ۵/۷۳ درصد بر سختی آلومینیوم سری ۷۰۷۵ مؤثر می‌باشند. همان‌طور که در جدول قابل مشاهده است پیشروی بیشترین تأثیر و شکل ابزار کمترین تأثیر را بر سختی در فرایند اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم ۷۰۷۵ دارند. از رگرسیون برای

تعیین رابطه سرعت دورانی، پیشروی، تعداد پاس و شکل ابزار به‌عنوان متغیرهای ورودی با استحکام به‌عنوان متغیر خروجی استفاده شده است. در معادله ۲ مدل رگرسیون برای سختی نشان داده شده است.

$$\text{Hardness} = 47.21 + 0.489 \text{ No. of passes} + 0.0708 \text{ Traverse speed} - 0.00450 \text{ Rotational speed} - 0.050 \text{ Tool shape} \quad (2)$$

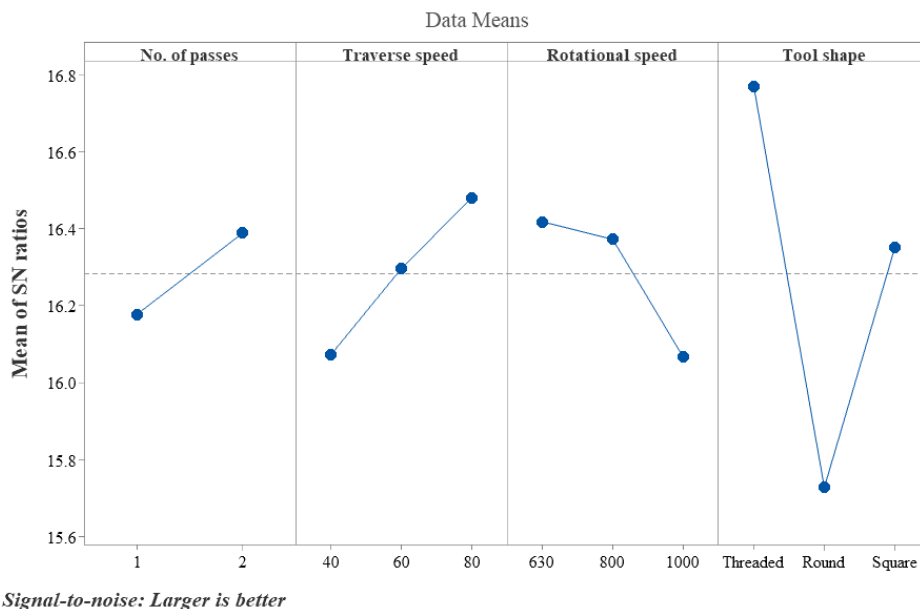
جدول ۶ آنالیز واریانس برای سختی آلومینیوم ۷۰۷۵

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	درصد تأثیر
تعداد پاس	۱	۴/۰۳۰	۴/۰۳۰	۶/۸۲
پیشروی	۲	۳۲/۶۳۷	۱۶/۳۱۸	۵۵/۲۲
سرعت دورانی	۲	۱۱/۶۹۰	۵/۸۴۵	۱۹/۷۸
شکل ابزار	۲	۳/۳۸۶	۱/۶۹۳	۵/۷۳
خطا	۱۰	۷/۳۵۸	۰/۷۳۵	۱۲/۴۵
مجموع	۱۷	۵۹/۱۰۴		۱۰۰

۳-۳- مدول الاستیک

مدول الاستیک یکی دیگر از مهمترین خواص مکانیکی مواد صنعتی است که در این قسمت مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. مدول الاستیک به‌عنوان یکی از متغیرهای خروجی فرایند اصطکاکی اغتشاشی، به عوامل مختلفی وابسته است. مدول الاستیک به‌صورت نسبت بین تنش و کرنش تعریف می‌شود. در واقع هر عاملی که تنش و کرنش را دچار تغییر بکند باعث تغییرات در مقدار مدول الاستیک ماده مورد نظر می‌شود. شکل ۹ نمودار نسبت سیگنال به نویز پارامترهای ورودی بر مدول الاستیک آلومینیوم سری ۷۰۷۵ را ارائه می‌دهد. با توجه به اهمیت افزایش مدول الاستیک آلومینیوم سری ۷۰۷۵ حالت "بیشتر بهتر" مورد استفاده قرار گرفته است.

Main Effects Plot for SN ratios

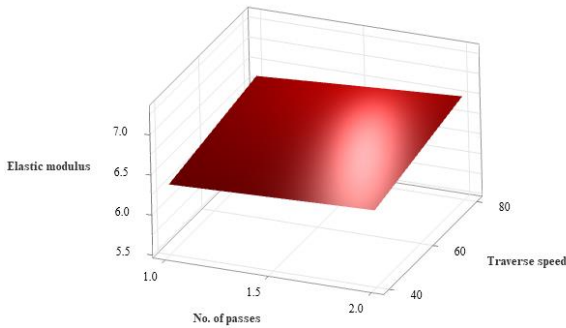


شکل ۹ نمودار نسبت سیگنال به نویز تأثیر پارامترهای ورودی بر مدول الاستیک

همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند تغییر مدول الاستیک با افزایش تعداد پاس انجام فرایند و پیشروی افزایشی است. سهم پیشروی در افزایش مدول الاستیک بیشتر از تعداد پاس می‌باشد. با افزایش تعداد پاس انجام فرایند، میزان تغییر شکل پلاستیک افزایش می‌یابد که منجر به کاهش اندازه دانه‌ها می‌شود. از آنجایی که کاهش اندازه دانه‌ها افزایش مرزدانه‌ها را سبب می‌شود در نتیجه

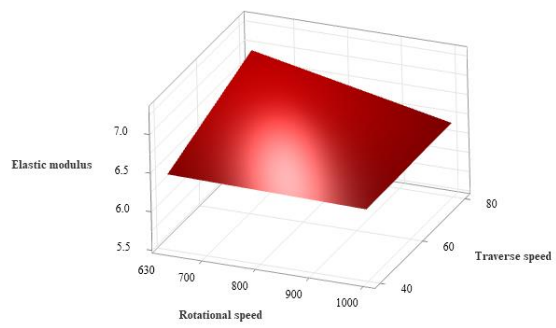
موانع بر سر راه حرکت نابه‌جایی‌ها افزایش می‌یابد که در این صورت برای تغییر شکل نیروی بیشتری نیاز است. بنابراین کاهش اندازه دانه‌ها بهبود مدول الاستیک را به دنبال دارد. با توجه به آنچه که در شکل ۹ مشخص است با افزایش سرعت دورانی از ۶۳۰ تا ۱۰۰۰ دور بر دقیقه مدول الاستیک کاهش می‌یابد. به واسطه افزایش سرعت دورانی از ۶۳۰ تا ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و روند افزایشی دما، اندازه دانه‌ها بزرگتر می‌شود در نتیجه مدول الاستیک روندی کاهشی از خود نشان می‌دهد. مطابق شکل، مدول الاستیک مربوط به فرایند اصطکاکی اغتشاشی با ابزار مخروطی رزوه شده بیشتر از ابزار گرد و مربعی شکل است. فرایند اصطکاکی اغتشاشی با ابزار گرد کمترین میزان مدول الاستیک نسبت دو ابزار دیگر را نشان می‌دهد. کار با ابزار مخروطی رزوه شده کیفیت هم‌زدن و اختلاط بالاتری ارائه می‌دهد. افزایش قدرت اختلاط و ایجاد تغییر شکل پلاستیک بیشتر ابزار مخروطی رزوه شده موجب افزایش مدول الاستیک آلومینیوم سری ۷۰۷۵ می‌شود. روند مشاهده شده در مورد تأثیر پارامترهای ورودی بر مدول الاستیک، با نتایج به دست آمده توسط سایر محققان [۲۷، ۲۸] مطابقت دارد. حالت بهینه برای دستیابی به بیشترین مدول الاستیک عبارت است از: ۲ پاس فرایند اصطکاکی اغتشاشی با ابزار مخروطی رزوه شده با سرعت دورانی ۶۳۰ دور بر دقیقه و پیشروی ۸۰ میلی‌متر بر دقیقه. در شکل ۱۰ نمودار سطح اثر متقابل پارامترهای ورودی بر مدول الاستیک ارائه شده است.

Surface Plot of Elastic modulus vs Traverse speed, No. of passes



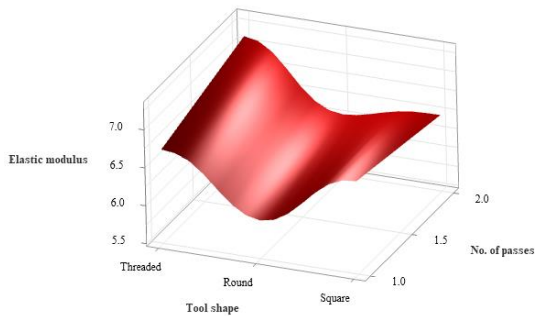
(ب)

Surface Plot of Elastic modulus vs Traverse speed, Rotational speed



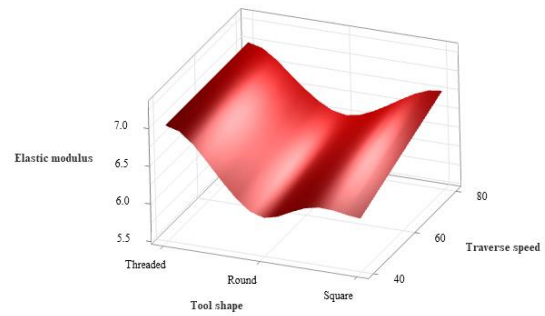
(الف)

Surface Plot of Elastic modulus vs No. of passes, Tool shape



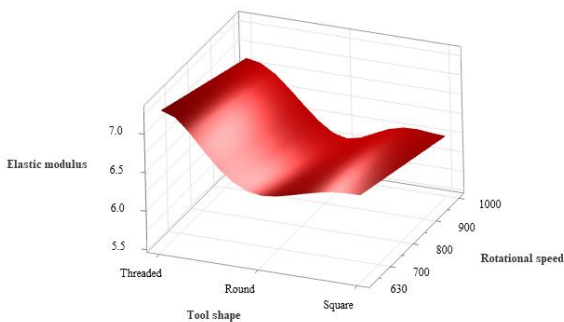
(ت)

Surface Plot of Elastic modulus vs Traverse speed, Tool shape



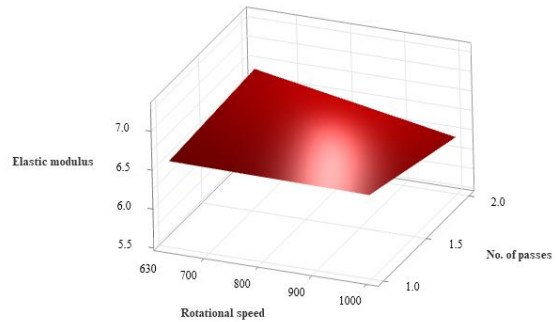
(پ)

Surface Plot of Elastic modulus vs Rotational speed, Tool shape



(ج)

Surface Plot of Elastic modulus vs No. of passes, Rotational speed



(ث)

شکل ۱۰ نمودار سطح اثر متقابل پارامترهای ورودی بر مدول الاستیک (الف) اثر متقابل سرعت دورانی و پیشروی، (ب) اثر متقابل تعداد پاس و پیشروی، (پ) اثر متقابل شکل ابزار و پیشروی، (ت) اثر متقابل تعداد پاس و شکل ابزار، (ث) اثر متقابل تعداد پاس و سرعت دورانی، (ج) اثر متقابل شکل ابزار و سرعت دورانی

همان‌طور که در شکل ۱۰-ب مشخص است افزایش همزمان پیشروی و تعداد پاس منجر به افزایش مدول قطعه کار می‌شود. با توجه به شکل ۱۰-ج مدول قطعه کار با افزایش سرعت دورانی در هر سه شکل ابزار روند افزایشی از خود نشان می‌دهد. بیشترین مدول مربوط به سرعت دورانی ۶۳۰ دور بر دقیقه در فرایند اصطکاکی اغتشاشی با ابزار مخروطی رزوه شده می‌باشد. آنالیز واریانس برای بررسی میزان تأثیر متغیرهای ورودی بر مدول الاستیک آلومینیوم سری ۷۰۷۵ نیز انجام گردید. جدول ۷ آنالیز واریانس برای مدول الاستیک را نشان می‌دهد. در فرایند اصطکاکی اغتشاشی میزان تأثیر شکل ابزار، تعداد پاس، سرعت دورانی و پیشروی بر مدول الاستیک قطعه به ترتیب ۵۴/۹۹، ۷/۱۷، ۱۰/۷۷ و ۱۱/۲ درصد می‌باشد.

جدول ۷ آنالیز واریانس برای مدول الاستیک آلومینیوم ۷۰۷۵

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	درصد تأثیر
تعداد پاس	۱	۰/۲۵۸	۰/۲۵۸	۷/۱۷
پیشروی	۲	۰/۴۰۳	۰/۲۰۱	۱۱/۲
سرعت دورانی	۲	۰/۳۸۷	۰/۱۹۳	۱۰/۷۷
شکل ابزار	۲	۱/۹۷۹	۰/۹۸۹	۵۴/۹۹
خطا	۱۰	۰/۵۷۱	۰/۵۷۱	۱۵/۸۷
مجموع	۱۷	۳/۶۰۰		۱۰۰

همان‌طور که مشهود است در فرایند اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم ۷۰۷۵ بیشترین تأثیر را شکل ابزار و کمترین تأثیر را تعداد پاس بر مدول الاستیک دارد. برای تعیین رابطه سرعت دورانی، پیشروی، تعداد پاس و شکل ابزار به‌عنوان متغیرهای مستقل با مدول الاستیک به‌عنوان متغیر وابسته از رگرسیون استفاده شده است. در معادله ۳ مدل رگرسیون برای مدول الاستیک نشان داده شده است.

$Elastic modulus =$

$$7.286 - 0.145 \text{ No. of passes} + 0.00735 \text{ Traverse speed} - 0.000773 \text{ Rotational speed} - 0.171 \text{ Tool shape} \quad (3)$$

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی اثر سرعت دورانی، پیشروی، تعداد پاس و شکل ابزار به‌عنوان پارامترهای مؤثر فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر استحکام کششی، مدول الاستیک و سختی آلومینیوم ۷۰۷۵ پرداخته شده است. بنابر نتایج به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت: افزایش تعداد پاس منجر به بهبود خواص مکانیکی شامل استحکام کششی، سختی و مدول الاستیک آلومینیوم ۷۰۷۵ می‌شود. با افزایش تعداد پاس انجام فرایند، میزان تغییر شکل پلاستیک افزایش می‌یابد که منجر به کاهش اندازه دانه‌ها می‌شود. از آنجایی که کاهش اندازه دانه‌ها افزایش مرزدانه‌ها را سبب می‌شود در نتیجه موانع بر سر راه حرکت نابه‌جایی‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش مرزدانه‌ها برای تغییر شکل نیروی بیشتری نیاز است. بنابراین کاهش اندازه دانه‌ها بهبود مدول الاستیک و استحکام را به دنبال دارد. افزایش پیشروی و کاهش سرعت دورانی باعث افزایش استحکام کششی، سختی و مدول الاستیک می‌شود. با افزایش سرعت دورانی و کاهش پیشروی دمای ورودی فرایند افزایش می‌یابد. در حین فرایند افزایش دمای ورودی رشد اندازه دانه‌ها را به دنبال دارد. طبق رابطه هال پیچ خواص مکانیکی مواد به اندازه دانه‌ها بستگی دارد. دانه‌های ریزتر بهبود خواص مکانیکی را به دنبال دارند و با رشد اندازه دانه خواص مکانیکی تقلیل می‌یابد. تولید دانه‌های ریزتر با افزایش پیشروی و کاهش سرعت دورانی دلیل بهبود استحکام کششی، سختی و مدول الاستیک آلومینیوم ۷۰۷۵ است. ابزار مخروطی رزوه شده خواص مکانیکی بهتری نسبت به سایر ابزارها از خود نشان می‌دهد. ابزار مخروطی رزوه شده به دلیل توانایی اختلاط و هم زدن بهتر و به دنبال آن تغییر شکل پلاستیک بیشتر دانه‌های ریزتری را تولید می‌کند. دلیل بهبود استحکام کششی، سختی و مدول الاستیک هنگام استفاده از ابزار مخروطی رزوه شده نسبت به سایر ابزارها، تولید دانه‌هایی با اندازه‌های کوچکتر است.

References

- [1] Aeinehbandi S, Ghoreishi M, Ghasemi Jabal A, Mehrafshan MM. Optimization of drilling of AA7075 metal matrix composites using responsesurface method. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Dec 21;11(10):32-44. doi: 10.22034/Ijme.2024.461244.1969 [In Persian]
- [2] Jalil A, Bani Mostafa Arab N, Naderi M, Dadgar Asl Y. Analysis of the effect of the hot stamping process on mechanical properties of 7075 aluminum alloy sheet. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 July 23;10(5):68-78. doi: 10.22034/IJME.2023.424240.1872 [In Persian]
- [3] Patil NA, Pedapati SR, Mamat OB. A review on aluminium hybrid surface composite fabrication using friction stir processing. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2020;65:441-57. doi: 10.24425/amm.2020.131747
- [4] Reddy SS, Sreedhar C, Suresh S. Investigations on Al 7075/nano-SiC/B4C hybrid reinforcements using liquid casting method. *Materials Today: Proceedings*. 2021 Jan 1;46:8540-7. doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.536
- [5] Akbarpour MR, Mirabad HM, Gazani F, Khezri I, Chadegani AA, Moeini A, Kim HS. An overview of friction stir processing of Cu-SiC composites: Microstructural, mechanical, tribological, and electrical properties. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023 Nov 1;27:1317-49. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.09.200
- [6] Maurya M, Kumar S, Maurya NK. Composites Prepared via Friction Stir Processing Technique: A Review. *Journal of Composite & Advanced Materials/Revue des Composites et des Matériaux Avancés*. 2020 Aug 1;30:143-51. doi: 10.18280/rcma.303-404
- [7] Kesharwani R, Jha KK, Imam M, Sarkar C, Barsoum I. Correlation of microstructure, texture, and mechanical properties of friction stir welded Joints of AA7075-T6 plates using a flat tool pin profile. *Heliyon*. 2024 Feb 15;10(3). doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25449
- [8] Qin D, Xiao X, Mao Y, Wang X, Fu L. Microstructure evolution, mechanical properties and corrosion resistance of biological particles reinforced AZ31 magnesium matrix composites fabricated by high rotating speed friction stir processing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023 May 1;24:9141-55. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.05.140
- [9] Adetunla A, Akinlabi E. Fabrication of aluminum matrix composites for automotive industry via multipass friction stir processing technique. *International Journal of Automotive Technology*. 2019 Dec;20:1079-88. doi: 10.1007/s12239-019-0101-0
- [10] Sharma A, Dwivedi VK, Singh YP. The effect of different conditions on the tensile properties of AA7075-T6 during the friction stir welding process. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2023;68:813-21. doi: 10.24425/amm.2023.142466
- [11] Kumar A, Kumar V. Fabrication and optimization of AA7075-7% SiC surface composites using RSM technique via friction stir processing. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*. 2023 Sep 1;3:100022. doi: 10.1016/j.jalms.2023.100022
- [12] Gaikwad VS, Chinchankar S. Mechanical properties, microstructure, and fracture behavior of friction stir welded AA7075 joints with conical pin and conical threaded pin type tools. *Scientia Iranica*. 2023 Feb 1;30(1):1-5. doi: 10.24200/sci.2022.59154.6087
- [13] Hammoodi SJ, Subhi AD. Optimizing surface characteristics and mechanical properties of aluminum 7075 alloy through friction stir processing technique. In *AIP Conference Proceedings 2024 Nov 13 (Vol. 3229, No. 1)*. AIP Publishing. doi: 10.1063/5.0238332
- [14] Pradeep Kumar J, Robinson Smart DS, Manova S, Ummal Salmaan N. Effect of TaC/Ti/Si3N4 hard ceramics on mechanical and microstructural behaviour of AA7075 processed through stir casting process. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022;2022(1):6804011. doi: 10.1155/2022/6804011
- [15] Kumar A, Kumar V. Tribological and impact-toughness performance of friction stir processed AA7075. *Engineering Research Express*. 2024 Feb 2;6(1):015075. doi: 10.1088/2631-8695/ad2246
- [16] El-Sayed MM, Shash AY, Abd-Rabou M, ElSherbiny MG. Welding and processing of metallic materials by using friction stir technique: A review. *Journal of Advanced Joining Processes*. 2021 Jun 1;3:100059. doi: 10.1016/j.jajp.2021.100059
- [17] Zykova AP, Tarasov SY, Chumaevskiy AV, Kolubaev EA. A review of friction stir processing of structural metallic materials: process, properties, and methods. *Metals*. 2020 Jun 9;10(6):772. doi: 10.3390/met10060772
- [18] Gupta MK. Friction stir process: a green fabrication technique for surface composites—a review paper. *SN Applied Sciences*. 2020 Apr;2(4):532. doi: 10.1007/s42452-020-2330-2
- [19] Luo J, Xiang JF, Yuan L, Lin HX, Wu XR, Xie DZ. Heat transfer and metal flow behavior of AA7075 high-strength aluminum alloy in a new current-induced friction stir welding with a multi-physics field model based on the inverse method and parameter scanning batch processing technique. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020 Dec;111:2615-35. doi: 10.1007/s00170-020-06249-y
- [20] Abolusoro OP, Akinlabi ET, Kailas SV. Tool rotational speed impact on temperature variations, mechanical properties and microstructure of friction stir welding of dissimilar high-strength aluminium alloys. *Journal*

- of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2020 Apr;42(4):176. doi: [10.1007/s40430-020-2259-9](https://doi.org/10.1007/s40430-020-2259-9)
- [21] Baghdadchi A, Patel V, Li W, Yang X, Andersson J. Ductilization and grain refinement of AA7075-T651 alloy via stationary shoulder friction stir processing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023 Nov 1;27:5360-7. doi: [10.1016/j.jmrt.2023.11.041](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.041)
- [22] Milenković S, Zivic F, Jovanović Ž, Andreja R, Petar L, Grujovic N. Review of friction stir processing (FSP) parameters and materials for surface composites. *Tribology in Industry*. 2021 Aug 28;43(3):470-9. doi: [10.24874/ti.1169.06.21.08](https://doi.org/10.24874/ti.1169.06.21.08)
- [23] Abolusoro OP, Akinlabi ET. Effects of processing parameters on mechanical, material flow and wear behaviour of friction stir welded 6101-T6 and 7075-T651 aluminium alloys. *Manufacturing Review*. 2020;7:1. doi: [10.1051/mfreview/2019026](https://doi.org/10.1051/mfreview/2019026)
- [24] Mabuwa S, Msomi V. The influence of multiple pass submerged friction stir processing on the microstructure and mechanical properties of the FSWed AA6082-AA8011 joints. *Metals*. 2020 Oct 28;10(11):1429. doi: [10.3390/met10111429](https://doi.org/10.3390/met10111429)
- [25] Seshu Kumar GS, Anshuman K, Rajesh S, Raju Chekuri RB, Ramakotaiah K. Optimization of FSW process parameters for welding dissimilar 6061 and 7075 Al alloys using Taguchi design approach. *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*. 2022 Mar 1;13(1):1011-22. doi: [10.22075/ijnaa.2021.24678.2795](https://doi.org/10.22075/ijnaa.2021.24678.2795)
- [26] Akinlabi ET, Mahamood RM, Akinlabi SA, Ogunmuyiwa E. Processing parameters influence on wear resistance behaviour of friction stir processed Al-TiC composites. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014;2014(1):724590. doi: [10.1155/2014/724590](https://doi.org/10.1155/2014/724590)
- [27] Zainelabdeen IH, Al-Badour FA, Adesina AY, Suleiman R, Ghaith FA. Friction stir surface processing of 6061 aluminum alloy for superior corrosion resistance and enhanced microhardness. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2023 Mar 1;6(1):129-39. doi: [10.1016/j.ijlmm.2022.06.004](https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2022.06.004)
- [28] Moustafa EB, Alazwari MA, Abushanab WS, Ghandourah EI, Mosleh AO, Ahmed HM, Taha MA. Influence of friction stir process on the physical, microstructural, corrosive, and electrical properties of an Al-Mg alloy modified with Ti-B additives. *Materials*. 2022 Jan 22;15(3):835. doi: [10.3390/ma15030835](https://doi.org/10.3390/ma15030835)