



تحلیل آماری پارامترهای موثر بر خواص مکانیکی کامپوزیت سطحی $Al7075/Al_2O_3$ حاصل از فرآوری اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از روش رویه پاسخ

مهدی وحدتی^{۱*} و محمود مرادی^۲

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۶/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۱۴

چکیده

برای بهبود خواص آلومینیم و آلیاژهای آن، راهکارهای متنوعی مورد توجه قرار گرفته است. در این میان، استفاده از فرآیندهای حالت جامد همچون فرآوری اصطکاکی اغتشاشی برای ایجاد کامپوزیت سطحی بسیار مناسب است. از این رو، با توجه به قابلیت این فرآیند به عنوان یک فرآیند حرارتی- مکانیکی و مزایای آن در تولید کامپوزیت سطحی زمینه فلزی، در پژوهش پیش رو، کامپوزیت‌های سطحی آلومینیم ۷۰۷۵ با به‌کارگیری ذرات تقویت‌کننده اکسید آلومینیم، با استفاده از این فرآیند و منطبق بر اصول طراحی آزمایش، تولید شدند. بدین منظور، روش رویه پاسخ به عنوان روش طراحی آزمایش، انتخاب گردید و متغیرهای: سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی ابزار، قطر شانه ابزار و اندازه ذرات تقویت‌کننده به عنوان متغیرهای ورودی فرآیند، تعیین شدند. در ادامه، تحلیل آماری پارامترهای موثر بر خواص مکانیکی کامپوزیت سطحی $Al7075/Al_2O_3$ به انجام رسید. نتایج حاصل از آنالیز واریانس و تحلیل رگرسیون داده‌های حاصل از آزمون‌های تجربی، صحت و دقت معادلات رگرسیون را مورد تأیید قرار داد و نشان داد که عبارات خطی، تعاملی و سهموی از متغیرهای ورودی فرآیند، بر استحکام تسلیم و سختی نمونه‌های کامپوزیتی موثر هستند. همچنین، نرخ پیشروی ابزار و اندازه ذرات تقویت‌کننده به ترتیب به عنوان موثرترین عوامل خطی بر استحکام تسلیم و سختی قطعات کامپوزیتی معرفی شدند.

کلمات کلیدی: تحلیل آماری؛ روش رویه پاسخ؛ خواص مکانیکی؛ کامپوزیت سطحی؛ فرآوری اصطکاکی اغتشاشی.

Statistical Analysis of Parameters Affecting the Mechanical Properties of Surface Composite $Al7075/Al_2O_3$ Produced by Friction Stir Processing Using Response Surface Methodology

M. Vahdati^{1,*}, M. Moradi²

¹ Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

² Department of Mechanical Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

Abstract

In order to improve the properties of aluminum and its alloys, various solutions have been considered. In this regard, the use of solid-state processes such as FSP to create surface composite is very suitable. Hence, considering the FSP ability as a thermo-mechanical process and its advantages in the production of surface composite, in the present study, the $Al7075$ surface composites with the use of reinforcing particles (Al_2O_3) were produced in accordance with the DOE principles. To this end, the RSM was selected as the experiment design technique. So, the factors such as: tool rotational speed, tool feed rate, tool shoulder diameter, and reinforcing particle size were identified as the input variables. Then, statistical analysis of variables affecting the mechanical properties of surface composite $Al7075/Al_2O_3$ was performed. The obtained results from ANOVA and regression analysis of experimental data, confirmed the accuracy of regression equations. Furthermore, it is shown that the linear, interactional and quadratic terms of the input variables are effective on the yield strength and hardness of the composite samples. Also, the tool feed rate and the reinforcing particle size were introduced as the most effective linear factors on the yield strength and hardness of the composite components, respectively.

Keywords: Statistical Analysis; Response Surface Methodology; Mechanical Properties; Surface Composite; Friction Stir Processing.

۱- مقدمه

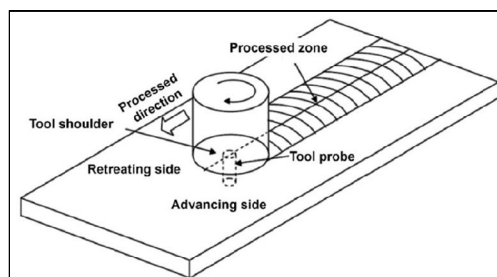
در این راستا، غلامی و همکاران [۱۶] تأثیر دما و زمان عملیات پیرسازی بر روی ریزساختار، خواص مکانیکی و رفتار سایشی آلیاژ $Al7075$ که تحت فرآیند FSP قرار گرفته بود را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان دادند که میکروساختار آلیاژ به صورت همگن و با دانه‌های ریز و هم محور ناشی از فرآیند تبلور مجدد، حاصل می‌شود. همچنین مقدار سختی در منطقه اغتشاشی (SZ) و فلز پایه (BM) به ترتیب به میزان ۳۰ و ۸۰ درصد افزایش یافت. آبراهاماس و همکاران [۱۷] نیز تأثیر پارامترهای فرآیند FSP بر خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیم 5005-H34 و 7075-T651 را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که افزایش سرعت پیشروی ابزار در مقایسه با سرعت دورانی ابزار، تأثیر بیشتری بر بهبود سختی و خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیم دارد.

از سوی دیگر، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی (AMMC)^۵، گروه جدیدی از مواد هستند که در مقایسه با آلیاژ آلومینیم از خواص مطلوبی همچون: مقاومت سایشی، مقاومت خوردگی، سفتی و سختی بالاتر برخوردار هستند [۱۸]. در این گروه از کامپوزیت‌ها، افزودن مواد پُرکننده به ویژه ذرات تقویت کننده سرامیکی موجب بهبود مقاومت سایشی و فرسایشی آلیاژ آلومینیم می‌شود [۱۹]. از این‌رو، برای اصلاح ریزساختار و بهبود خواص آلیاژ آلومینیم می‌توان از فرآیند FSP به منظور تولید کامپوزیت سطحی بهره گرفت [۲۰، ۲۱].

احمدی فرد و همکاران [۲۲] میکروساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت سطحی $Al5083/TiO_2$ حاصل از فرآیند FSP را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که افزایش تعداد پاس فرآیند موجب توزیع بهتر ذرات و افزایش سختی و استحکام ماده می‌شود. آن‌ها در مطالعه دیگری، نانوکامپوزیت ترکیبی $Al2024/Gr/ZrO_2$ را با استفاده از فرآیند FSP تولید کردند [۲۳]. نتایج نشان داد که استفاده از گرافیت و زیرکونیا باعث افزایش سختی و مقاومت به سایش می‌شود. گروه دیگری از محققان، تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند FSP در تولید اتصال کامپوزیتی $Al7075/WC$ را بررسی کردند [۲۴]. نتایج نشان داد که سرعت دورانی ابزار، سرعت

ویژگی‌های مطلوب آلومینیم و آلیاژهای آن، باعث شده است تا این گروه از فلزات، کاربرد وسیعی در صنایع خودرو، دریایی و هوا فضا داشته باشند [۱، ۲]. در این میان، آلیاژهای گروه ۷۰۰۰ به دلیل استحکام بالا و استحکام خستگی خوب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند [۳، ۴]. هنگامی که این آلیاژها در معرض سایش قرار می‌گیرند، رفتار مکانیکی و تریبولوژیکی ضعیفی از خود نشان می‌دهند [۵]. از این‌رو، برای بهبود خواص آن‌ها، راهکارهای متنوعی همچون: افزودن عناصر آلیاژی [۶]، کاهش اندازه دانه [۷] و کامپوزیت سازی [۸] مورد توجه قرار گرفته است. در این میان، روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD)^۱ به طور گسترده‌ای برای تولید میکروساختار فوق ریزدانه از آلیاژهای آلومینیم، مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۹-۱۱].

یکی از تکنیک‌های مهم SPD، فرآوری اصطکاکی اغتشاشی (FSP)^۲ است. در حقیقت، این فرآیند ترمومکانیکی از فناوری جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اقتباس شده است [۱۲، ۱۳]. فرآیند FSP یک روش نسبتاً جدید برای تغییر شکل پلاستیک شدید و بهسازی ریزساختار مواد است که در سال ۱۹۹۹ میلادی ابداع شد [۱۴]. در این فرآیند، اعمال کرنش برشی بالا به جنس قطعه کار، موجب می‌شود تا میکروساختار فوق ریز دانه در دمایی زیر نقطه ذوب ماده، ایجاد شود. اصول اجرای فرآیند FSP در شکل ۱ نشان داده شده است.



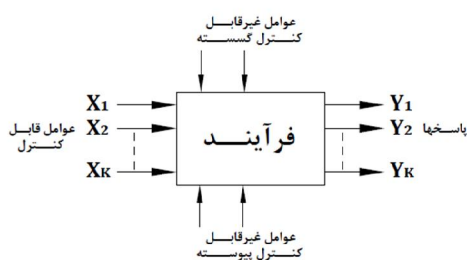
شکل ۱- طرح کلی از فرآیند FSP [۱۵]

³ Stir Zone⁴ Base Metal⁵ Aluminium Metal Matrix Composite¹ Severe Plastic Deformation² Friction-Stir Processing

آماری آزمون (روش رویه پاسخ) و استخراج معادلات رگرسیون پارامترهای پاسخ (استحکام تسلیم و سختی).

۲- اصول و روش تحلیل آماری

آزمایش طراحی شده، یک آزمون یا دنباله‌ای از آزمون‌هاست که تغییرات مورد نظر، در متغیرهای ورودی فرآیند اعمال می‌شود، به طوری که می‌توان علل تغییرات در پاسخ‌های خروجی را مشاهده و مشخص نمود. فرآیند تحت مطالعه را می‌توان توسط مدلی که در شکل ۲ نشان داده شده است، معرفی کرد.



شکل ۲- مدلی از فرآیند تحت مطالعه

با فرض مستقل بودن عوامل قابل کنترل (X) و پاسخ‌های حاصل از فرآیند (Y), هدف این است که ارتباط میان متغیرهای پاسخ با متغیرهای ورودی، با حداقل خطا و به صورت یک مدل ریاضی، به دست آید. بدین منظور، روش اجرایی تحلیل آماری در این پژوهش، شامل شش گام زیر است:

- انتخاب متغیرهای پاسخ
- انتخاب عوامل آزمایش و سطوح تغییرات
- انتخاب طرح آزمایش
- اجرای آزمایش
- اندازه‌گیری متغیرهای پاسخ
- تجزیه و تحلیل نتایج

۳- انتخاب متغیرهای پاسخ

به منظور ارزیابی خواص مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی $Al7075/Al_2O_3$, از دو شاخص مهم استحکام تسلیم و میکروسختی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه در مقطع

جوشکاری و هندسه پروفیل پین، بیشترین تأثیر را بر استحکام اتصال جوش دارد. کومار و همکاران [۲۵] رفتار خوردگی کامپوزیت‌های $Al7075/TiC$ حاصل از فرآیند FSP را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که افزودن ذرات TiC موجب افزایش مقاومت خوردگی کامپوزیت می‌شود. گروه دیگری از محققان، تأثیر افزودن سه نوع متفاوت از مواد پُرکننده (نانو لوله کربنی، مس و سیلیکون کارباید) به آلیاژ $Al7075$ که تحت عملیات FSP و پیرسازی قرار گرفته بود را مورد بررسی قرار دادند [۲۶]. آن‌ها دریافتند که استفاده از سیلیکون کارباید به طور موثری باعث افزایش سختی، چقرمگی ضربه‌ای و مقاومت سایشی کامپوزیت سطحی می‌شود.

از این رو، به منظور تکمیل و توسعه تحقیقات انجام شده در این زمینه و با توجه به قابلیت و مزایای فرآوری اصطکاکی اغتشاشی در تولید کامپوزیت سطحی زمینه فلزی، در مقاله پیش‌رو، کامپوزیت‌های سطحی زمینه آلومینیمی $Al7075/Al_2O_3$ با استفاده از ذرات تقویت کننده از جنس اکسید آلومینیم و با به کارگیری فرآیند FSP تولید شدند. بدین منظور، روش رویه پاسخ^۱ به عنوان روش طراحی آزمایش^۲، انتخاب شد. در ادامه، تحلیل آماری پارامترهای موثر بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های سطحی، به انجام رسید. صحت و دقت معادلات رگرسیون با استفاده از نتایج حاصل از آنالیز واریانس^۳ و تحلیل رگرسیون داده‌های تجربی، مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، چگونگی تأثیر متغیرهای ورودی فرآیند همچون: سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی ابزار، قطر شانه ابزار و اندازه ذرات تقویت کننده، بر استحکام تسلیم و سختی نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به تحقیقات مرور شده در زمینه تولید و مطالعه کامپوزیت سطحی زمینه آلومینیمی، مهمترین جوانب نوآوری مقاله پیش‌رو در مقایسه با تحقیقات منتشر شده عبارتند از تمایز و تفاوت در: جنس ذرات تقویت کننده (اکسید آلومینیم)، بررسی اندازه ذرات تقویت کننده، نوع پارامترهای خروجی فرآیند، نوع متغیرهای ورودی فرآیند، روش طراحی و تحلیل

¹ Response Surface Methodology (RSM)

² Design of Experiment (DOE)

³ Analysis of Variance (ANOVA)

در این رابطه، X مقدار کد شده پارامتر مورد نظر با مقدار واقعی x (بین x_{min} و x_{max}) است. x_{min} و x_{max} نیز به ترتیب مقادیر واقعی پایین و بالای پارامتر هستند. دامنه تغییر هر یک از این عوامل بر اساس آزمایشات اولیه که منتج به تولید سالم نمونه نهایی شد، تعیین گردید (جدول ۱).

جدول ۱- عوامل آزمایش و دامنه تغییرات آنها

متغیر	نماد	واحد	-۱	۰	+۱
سرعت دورانی ابزار	N	rpm	۴۰۰	۸۰۰	۱۲۰۰
نرخ پیشروی ابزار	S	mm/min	۲۰	۶۰	۱۰۰
قطر شانه ابزار	D	mm	۹	۱۵	۲۱
اندازه ذرات تقویت کننده	P	μm	۲۰	۵۰	۸۰

۵- انتخاب طرح آزمایش

در پژوهش پیش رو، روش رویه پاسخ به عنوان روش طراحی آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۹-۳۱]. در اکثر مسائل مربوط به روش رویه پاسخ، نحوه ارتباط میان پاسخ و متغیرهای ورودی، نامعلوم است.

بنابراین اولین قدم در این روش، یافتن تقریبی مناسب از رابطه واقعی موجود میان متغیر پاسخ (y) و مجموعه متغیرهای مستقل (x) است. توابع تقریب کننده به صورت مدل‌های مرتبه اول و مرتبه دوم می‌باشند و به صورت روابط زیر نوشته می‌شوند:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (3)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4)$$

در توابع فوق، β_0 مقدار ثابت، β_i ضرایب خطی، β_{ii} ضرایب مرتبه دو، β_{ij} ضرایب تعامل اثر، k تعداد متغیرهای مستقل و ε مقدار خطای مشاهده شده در پاسخ است. در این پژوهش، از مدل مرتبه دوم استفاده می‌شود.

عرضی نمونه تولیدی، چهار ناحیه به نام‌های فلز پایه (BM)، منطقه متأثر از حرارت (HAZ)^۱، منطقه متأثر از حرارت و کار مکانیکی (TMAZ)^۲ و منطقه اغتشاشی (SZ) وجود دارد، به منظور بررسی تغییرات میکروسختی مناطق ناشی از اجرای فرآیند FSP (SZ، TMAZ و HAZ) نسبت به فلز پایه، بهتر است از پارامتر MHD^۳ استفاده شود. این پارامتر بر میزان انحراف میکروسختی مقطع فرآوری شده نسبت به میکروسختی فلز پایه (AI7075) دلالت دارد. مقدار انحراف میکروسختی نسبت به فلز پایه، از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$MHD = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - x_{bm})^2}{n} \quad (1)$$

در این رابطه، x_i : میکروسختی نقاط مختلف در مقطع نمونه و x_{bm} : میکروسختی فلز پایه است. همچنین، تعداد نقاطی که میکروسختی آنها اندازه‌گیری شده است با نماد n مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میان پارامتر MHD و میکروسختی یک رابطه مستقیم وجود دارد. از این‌رو، با افزایش میکروسختی، مقدار این پارامتر نیز افزایش می‌یابد. از این رو در پژوهش حاضر، استحکام تسلیم نمونه‌های تولیدی و انحراف میکروسختی مقطع فرآوری شده نسبت به فلز پایه (MHD) به عنوان متغیرهای پاسخ، انتخاب شدند.

۴- انتخاب عوامل آزمایش و سطوح تغییرات

با توجه به پیشینه تحقیقات انجام شده در حوزه فرآیند FSP، چهار متغیر: سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی ابزار، قطر شانه ابزار و اندازه ذرات تقویت کننده به عنوان متغیرهای ورودی آزمایش انتخاب شدند و هر یک از آنها در سه سطح پایین (-۱)، میانه (۰) و بالا (+۱) مورد بررسی قرار گرفتند. سطوح بالا و پایین هر پارامتر به ترتیب با مقادیر (+۱) و (-۱) کُد گذاری می‌شود و مقدار کُد شده هر سطح دلخواه میانی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۸]:

$$X = \frac{2x - (x_{max} + x_{min})}{(x_{max} - x_{min})} \quad (2)$$

¹ Heat Affected Zone

² Thermo-Mechanically Affected Zone

³ Micro Hardness Deviation

۶- اجرای آزمایش

جنس ماده تحت آزمایش، آلیاژ Al7075-T6 است. جدول ۳، ترکیب شیمیایی این آلیاژ را نشان می‌دهد.

به منظور آماده سازی آلیاژ Al7075 در وضعیت T6، صفحات آلیاژی مطابق استاندارد AMSH6088 [۳۴] تحت عملیات حرارتی پیرسختی قرار گرفتند. بدین منظور در ابتدا عملیات انحلال به مدت یک ساعت و در دمای ۴۸۰ درجه سانتیگراد بر روی قطعات انجام شد. سپس، صفحات آلیاژی برای دستیابی به محلول جامد فوق اشباع تحت عملیات آبدهی^۱ قرار گرفتند. در ادامه، عملیات پیرسازی مصنوعی به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد بر روی قطعات انجام شد. در پایان، صفحات آلیاژی در معرض هوا خشک شدند. ذرات تقویت کننده مورد استفاده در فرآیند تولید کامپوزیت سطحی از جنس اکسید آلومینیم (Al₂O₃) هستند. این ذرات با خلوص بیش از ۹۹ درصد و در سه اندازه ۵۰، ۸۰ و ۱۰۰ میکرون تهیه شدند.

ابزارهای FSP از جنس فولاد ابزار گرم کار H13 در سه قطر شانه ۹، ۱۵ و ۲۱ میلیمتر و به ترتیب در سه قطر پین ۳، ۵ و ۷ میلیمتر و با هندسه مخروطی شیاردار، طراحی و ساخته شدند. قطر شانه و پین به ترتیب با حروف a و d در نقشه ابزار مشخص شده اند (شکل ۳).

جدول ۳- ترکیب شیمیایی آلیاژ Al7075-T6 [۳۳]

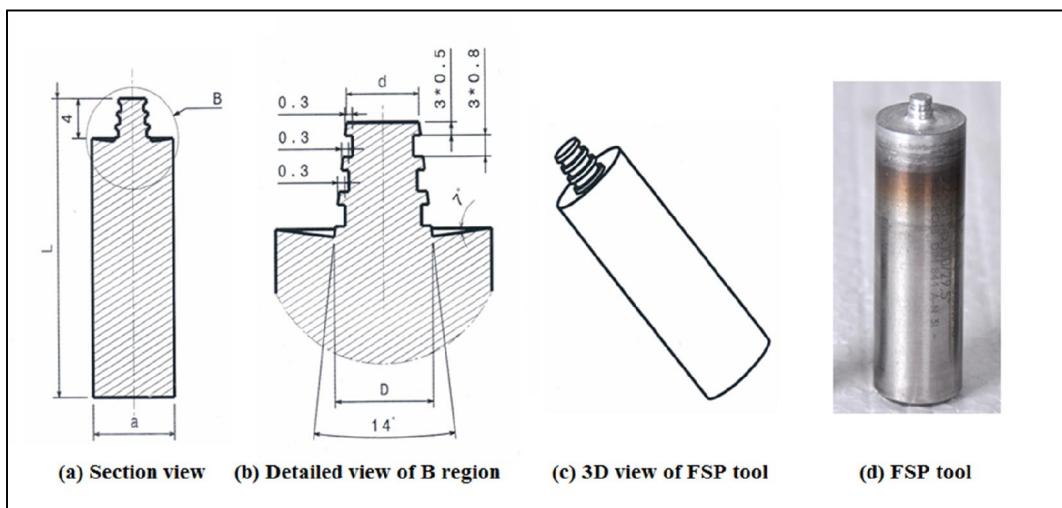
نام عنصر	درصد وزنی (%)
آلومینیم	۹۱/۴ - ۸۷/۱
روی	۶/۱ - ۵/۱
منیزیم	۲/۹ - ۲/۱
مس	۲ - ۱/۲
آهن	۰/۵
سیلیسیم	۰/۴
منگنز	۰/۳
کروم	۰/۲۸ - ۰/۱۸
تیتانیوم	۰/۲

^۱ Quenching

نرم افزار مورد استفاده به منظور طراحی آزمایش و تحلیل آماری، نرم‌افزار Design Expert [۳۲] است. جدول ۲، طراحی آزمایش را به صورت آزمون‌های کدگذاری شده و با تعداد ۳۱ اجرا، نشان می‌دهد که از این میان، تعداد هفت آزمون در سطوح مرکزی پارامترها (سطح صفر)، تکرار خواهد شد.

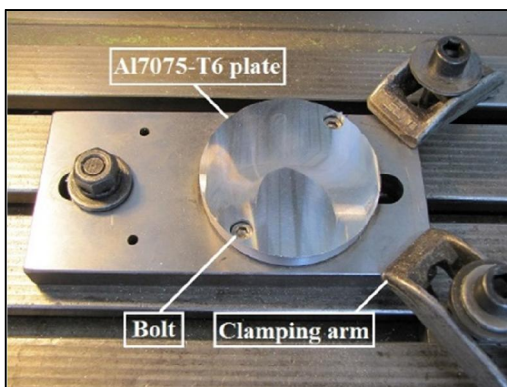
جدول ۲- طراحی اجرای آزمون‌ها و نتایج اندازه‌گیری

شماره آزمون	متغیرهای ورودی			متغیرهای خروجی		
	سرعت دورانی (N)	نرخ پیشروی (S)	قطر شانه (D)	اندازه ذرات (P)	استحکام تسلیم (MPa)	پارامتر MHD
۱	-۱	-۱	-۱	۱	۲۷۲	۳۹۳/۸۳۳
۲	-۱	۱	۱	۱	۳۴۰	۲۰۹/۸۳۳
۳	-۱	۱	۱	-۱	۳۳۱	۲۲۳/۳۳۳
۴	۱	۱	۱	-۱	۳۴۵	۱۵۳/۸۳۳
۵	۱	۱	-۱	۱	۳۹۰	۱۶۱/۵۰۰
۶	۰	۰	-۱	۰	۳۶۸	۲۲۶/۵۰۰
۷	-۱	-۱	۱	۱	۳۰۵	۲۵۵/۸۳۳
۸	۰	۰	۰	۰	۴۱۵	۱۸۳/۱۶۷
۹	۰	۰	۰	۰	۴۱۵	۱۸۳/۱۶۷
۱۰	۰	۱	۰	۰	۴۲۱	۲۲۱/۸۳۳
۱۱	۰	-۱	۰	۰	۳۱۲	۲۳۶/۱۶۷
۱۲	۱	-۱	-۱	-۱	۲۱۷	۲۰۸/۱۶۷
۱۳	۱	۱	-۱	۱	۳۵۱	۲۶۶/۶۶۷
۱۴	۰	۰	۰	۰	۴۱۵	۱۸۳/۱۶۷
۱۵	-۱	-۱	-۱	-۱	۳۱۰	۲۸۲/۳۳۳
۱۶	-۱	۱	-۱	-۱	۳۱۷	۲۱۴/۵۰۰
۱۷	۱	-۱	-۱	۱	۳۰۸	۲۶۵/۸۳۳
۱۸	-۱	۰	۰	۰	۳۲۷	۲۳۱
۱۹	۱	-۱	۱	-۱	۳۴۵	۲۵۹/۳۳۳
۲۰	۱	۰	۰	۰	۳۳۸	۳۸۲/۶۶۷
۲۱	۰	۰	۰	۱	۳۴۵	۲۸۵/۶۶۷
۲۲	۱	۱	-۱	-۱	۳۳۰	۱۷۹/۸۳۳
۲۳	۰	۰	۰	۰	۴۱۵	۱۸۳/۱۶۷
۲۴	۱	۱	۱	۱	۳۷۵	۲۱۳/۶۶۷
۲۵	۰	۰	۰	۰	۴۱۵	۱۸۳/۱۶۷
۲۶	۰	۰	۱	۰	۳۴۵	۲۵۷/۱۶۷
۲۷	۰	۰	۰	۰	۴۱۵	۱۸۳/۱۶۷
۲۸	۰	۰	۰	۰	۴۱۵	۱۸۳/۱۶۷
۲۹	-۱	-۱	۱	-۱	۳۱۵	۱۸۰/۸۳۳
۳۰	۰	۰	۰	-۱	۴۰۵	۲۴۱/۱۶۷
۳۱	-۱	۱	-۱	۱	۲۹۲	۳۹۰/۶۶۷



شکل ۳- طراحی و ساخت نمونه‌ای از ابزار FSP

مطابق استاندارد ASTM E8^۱ در راستای عمود بر مسیر اجرای فرآیند FSP، با استفاده از وایرکات^۲ استخراج و آماده شدند. سپس، هر یک از آنها با استفاده از دستگاه کشش INSTRON و با نرخ پیشروی ۲ میلی‌متر بر دقیقه در دمای اتاق تحت آزمون کشش قرار گرفتند. شکل ۷، تعدادی از نمونه‌های گسیخته شده پس از آزمون کشش را نشان می‌دهد.



شکل ۴- قرارگیری قطعه‌کار در فیکسچر

قطعات به فرم دایروی با قطر ۹۰ میلی‌متر و به ضخامت ۱۰ میلی‌متر آماده شدند. شکل ۴، قرارگیری قطعه‌کار در فیکسچر را نشان می‌دهد.

به منظور جایگذاری میکرو ذرات Al_2O_3 در سطح قطعه‌کار، تعداد ۱۸ سوراخ به قطر ۲ میلی‌متر و عمق ۳ میلی‌متر در فواصل ۴ میلی‌متری نسبت به یکدیگر و در راستای قطر قطعه‌کار ایجاد می‌شود (شکل ۵). پس از پُر نمودن سوراخ‌ها توسط پودر اکسید آلومینیم، درب سوراخ‌ها توسط ابزار فاقد پین، بسته شد. سپس، آزمون‌های FSP منطبق بر اصول تشریح شده در بخش مقدمه و مطابق ۳۱ ترکیب پارامتری مندرج در جدول ۲ با استفاده از ماشین فرز اونیورسال FP4MK انجام شدند. شکل ۶، نمونه‌ای از کامپوزیت سطحی $Al_2O_3/Al7075$ تولید شده در آزمون شماره ۱۱ را نشان می‌دهد.

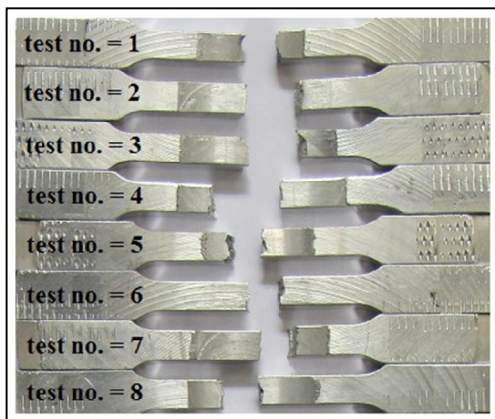
۷- اندازه‌گیری متغیرهای پاسخ

۷-۱- آزمون کشش

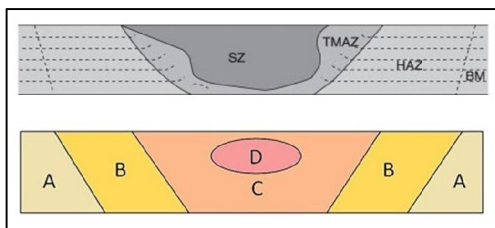
برای اندازه‌گیری استحکام تسلیم قطعات کامپوزیتی از آزمون کشش استفاده می‌شود. بدین منظور، نمونه‌های کشش

^۱ American Society for Testing and Materials

^۲ Wire Electrical Discharge Machining



شکل ۷- تعدادی از نمونه‌های کشیده شده



شکل ۸- اندازه‌گیری سختی در چهار منطقه از مقطع عرضی

محاسبه شد. نتایج اندازه‌گیری استحکام تسلیم و محاسبه پارامتر MHD نمونه‌های کامپوزیتی در جدول ۲ درج شده است.

۸- تجزیه و تحلیل نتایج

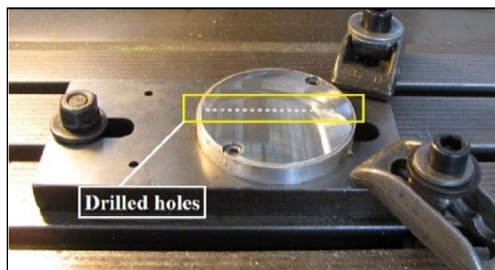
۸-۱- آنالیز واریانس داده‌ها

تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از این پژوهش با استفاده از آنالیز واریانس^۲ انجام می‌شود. همچنین به منظور ایجاد توابع ریاضی میان متغیرهای پاسخ و پارامترهای موثر در فرآیند، تحلیل رگرسیون^۳ به کار گرفته خواهد شد [۲۸]. میزان سطح ریسک^۴ (α) در فرآیند تحلیل، مساوی ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. جداول ۴ و ۵، نتایج حاصل از آنالیز واریانس مدل رگرسیون را به ترتیب برای استحکام تسلیم و پارامتر MHD نشان می‌دهند.

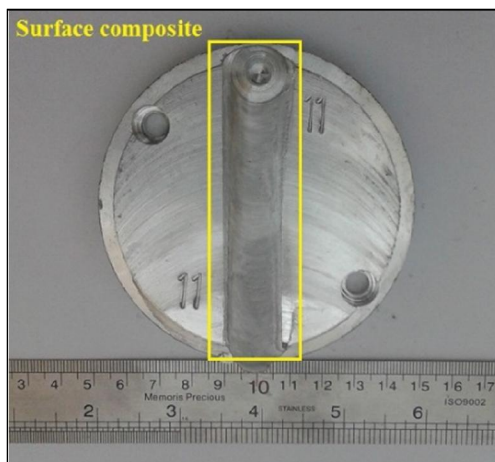
² Analysis of Variance (ANOVA)

³ Regression Analysis

⁴ Confidence Level



شکل ۵- سوراخکاری سطح قطعه‌کار



شکل ۶- نمونه‌ای از کامپوزیت سطحی $Al7075/Al_2O_3$

۷-۲- آزمون سختی‌سنجی

برای اندازه‌گیری سختی مقاطع نمونه‌های کامپوزیتی از آزمون ویکرز^۱ استفاده شد. از این‌رو، برای آماده‌سازی مقاطع عرضی، قطعات تولیدی تحت عملیات برش و سنباده‌زنی قرار گرفتند. سپس، هر یک از ۳۱ مقطع عرضی مطابق شکل ۸ در چهار منطقه (A) BM، (B) HAZ، (C) TMAZ و (D) SZ تحت آزمون سختی‌سنجی قرار گرفتند. آزمون‌ها منطبق بر استاندارد ASTM E384 و با استفاده از دستگاه میکروسختی-سنج BUEHLER انجام شدند. میزان بار اعمالی و مدت زمان بارگذاری به ترتیب برابر با ۳۰۰ گرم و ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شدند.

پس از ثبت داده‌های آزمون سختی‌سنجی، پارامتر MHD مطابق رابطه ۱ برای هر یک از مقاطع کامپوزیتی

¹ Vickers

جدول ۴- آنالیز واریانس مدل رگرسیون برای استحکام نسلیم

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل رگرسیون	۷	$2/763 \times 10^{-7}$	$3/947 \times 10^{-6}$	۶/۹۷	۰/۰۰۰۲
N (سرعت دورانی ابزار)	۱	$3/449 \times 10^{-5}$	$3/449 \times 10^{-5}$	۰/۶۱	۰/۴۴۳۰
S (نرخ پیشروی ابزار)	۱	$4/538 \times 10^{-6}$	$4/538 \times 10^{-6}$	۸/۰۲	۰/۰۰۹۵
D (قطر شانه ابزار)	۱	$1/524 \times 10^{-6}$	$1/524 \times 10^{-6}$	۲/۶۹	۰/۱۱۴۵
P (اندازه ذرات)	۱	۹۱۷۹۷/۵۶	۹۱۷۹۷/۵۶	۰/۱۶	۰/۶۹۰۹
N.P	۱	$1/844 \times 10^{-6}$	$1/844 \times 10^{-6}$	۳/۲۶	۰/۰۸۴۲
N^2	۱	$2/382 \times 10^{-6}$	$2/382 \times 10^{-6}$	۴/۲۱	۰/۰۵۱۸
D^2	۱	$8/113 \times 10^{-6}$	$8/113 \times 10^{-6}$	۱۴/۳۳	۰/۰۰۱۰
خطای مانده	۲۳	$1/302 \times 10^{-7}$	$5/660 \times 10^{-5}$	-	-
عدم برازش	۱۷	$1/012 \times 10^{-7}$	$5/952 \times 10^{-5}$	۱/۲۳	۰/۴۲۴۸
خطای خالص	۶	$2/899 \times 10^{-6}$	$4/831 \times 10^{-5}$	-	-
مجموع	۳۰	$4/065 \times 10^{-7}$	-	-	-

جدول ۵- آنالیز واریانس مدل رگرسیون برای پارامتر MHD

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل رگرسیون	۵	۴۱/۵۸	۸/۳۲	۲/۸۸	۰/۰۳۴۶
N (سرعت دورانی ابزار)	۱	۱/۶۹	۱/۶۹	۰/۵۹	۰/۴۵۱۴
S (نرخ پیشروی ابزار)	۱	۹/۰۸	۹/۰۸	۳/۱۴	۰/۰۸۸۴
D (قطر شانه ابزار)	۱	۴/۱۲	۴/۱۲	۱/۴۳	۰/۲۴۳۵
P (اندازه ذرات)	۱	۱۲/۹۶	۱۲/۹۶	۴/۴۹	۰/۰۴۴۳
N.D	۱	۱۳/۷۳	۱۳/۷۳	۴/۷۵	۰/۰۲۸۹
خطای مانده	۲۵	۷۲/۲۲	۲/۸۹	-	-
عدم برازش	۱۹	۷۰/۳۶	۳/۷۰	۱۱/۹۶	۰/۰۶۲۸
خطای خالص	۶	۱/۸۶	۰/۳۱	-	-
مجموع	۳۰	۱۱۳/۸۰	-	-	-

۸-۲- استحکام تسلیم

رابطه ۵، معادله رگرسیون استحکام تسلیم را به صورت تابعی از متغیرهای ورودی کدگذاری شده، ارائه می‌کند:

$$\begin{aligned} (Yield\ Stress)^{1.47} = & 6797.47 + 131.84N \\ & + 502.12S + 290.93D + 71.41P \\ & + 339.44NP - 705.51N^2 - 1212.15D^2 \end{aligned} \quad (5)$$

ظهور علامت مثبت برای ضرایب رگرسیون، وجود یک رابطه مستقیم میان عبارات و متغیر پاسخ را بیان می‌کند، در حالی که ظهور علامت منفی برای ضرایب رگرسیون، وجود یک رابطه معکوس میان عبارات و متغیر پاسخ را نشان می‌دهد. با توجه به استخراج معادله رگرسیون، می‌توان مقادیر استحکام تسلیم نمونه‌های کامپوزیتی را پیش از اجرای فرآیند و بر حسب متغیرهای ورودی، پیش‌بینی نمود. همان‌طور که در رابطه ۵ مشاهده می‌شود، تأثیر خطی متغیرهای ورودی فرآیند بر استحکام تسلیم به ترتیب اهمیت عبارتند از: نرخ پیشروی ابزار، قطر شانه ابزار، سرعت دورانی ابزار و اندازه ذرات تقویت‌کننده. همچنین، تأثیر سهموی متغیرهای ورودی فرآیند به ترتیب اهمیت عبارتند از: قطر شانه ابزار و سرعت دورانی ابزار.

از سوی دیگر، چگونگی تغییرات متغیر پاسخ بر حسب متغیرهای ورودی را می‌توان به صورت نمودارهای سه بُعدی منحنی رویه پاسخ^۲ نشان داد. در این نمودارها تأثیرات متقابل دو متغیر ورودی بر روی متغیر پاسخ قابل مشاهده است و مقادیر سایر متغیرهای ورودی در سطوح مرکزی (سطح صفر) ثابت در نظر گرفته می‌شوند.

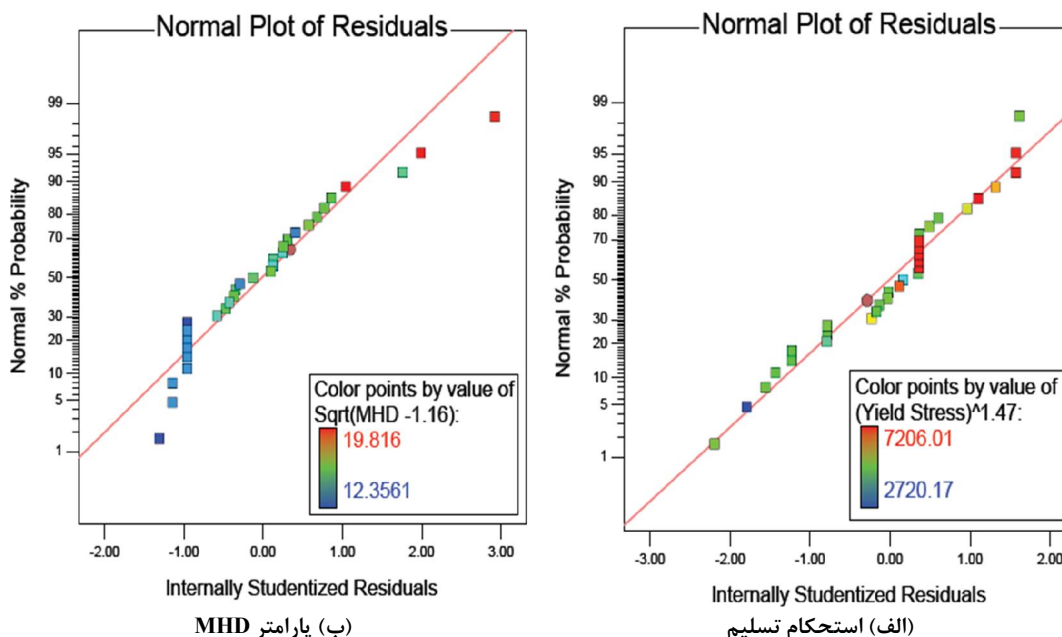
همان‌طور که در شکل (۱۰-الف) مشاهده می‌شود، تنظیم مقادیر پارامترهای سرعت دورانی و قطر شانه ابزار در سطح میانه منتج به دستیابی به ماکزیمم استحکام تسلیم نمونه کامپوزیتی می‌شود. بنابراین، در صورتی که از ابزار با قطر شانه ۱۵ میلی‌متر استفاده شود، افزایش سرعت دورانی از ۴۰۰ به ۸۰۰ دور بر دقیقه باعث افزایش استحکام تسلیم می‌شود. در این وضعیت، افزایش سرعت دورانی موجب

مؤثر بودن یک عبارت از طریق مقدار P مربوط به آن عبارت، مشخص می‌شود. هرچه مقدار P مربوط به یک عبارت کوچکتر باشد، معنی‌داری آن عبارت در مدل بیشتر خواهد بود. بنابراین با احتساب $\alpha = 0.05$ و بر اساس نتایج حاصل از آنالیز واریانس، پارامتر مرتبه اول S (نرخ پیشروی ابزار) و عبارت مرتبه دوم D^2 (مجدور قطر شانه ابزار) به عنوان عبارات مؤثر بر استحکام تسلیم نمونه‌ها و پارامتر مرتبه اول P (اندازه ذرات تقویت‌کننده) و عبارت تعاملی N.D (حاصل ضرب سرعت دورانی در قطر شانه ابزار) به عنوان عبارات مؤثر بر میزان انحراف میکروسختی مقاطع کامپوزیتی نسبت به فلز پایه (پارامتر MHD)، شناخته و معرفی شدند.

برای بررسی صحت مدل رگرسیون، از آزمون عدم برازش استفاده می‌شود. معنی‌دار بودن آزمون عدم برازش^۱ برای یک مدل ($P_{Lack\ of\ fit} \leq 0.05$) بیانگر آن است که داده‌ها به خوبی اطراف مدل قرار نگرفته‌اند و نمی‌توان از مدل برای پیش‌بینی مقادیر متغیر پاسخ استفاده نمود. بنابراین با تأیید عدم معنی‌داری آزمون عدم برازش ($P_{Lack\ of\ fit} > 0.05$)، می‌توان دریافت که مدل به خوبی می‌تواند بر داده‌های مورد بررسی، برازش شود. همان‌طور که در جداول ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، آزمون عدم برازش برای متغیرهای پاسخ، معنی‌دار نیست و در نتیجه مدل ارائه شده به خوبی روند داده‌ها را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، بهترین تحلیل زمانی صورت می‌گیرد که همزمان رگرسیون، مؤثر و عدم برازش، غیرمؤثر باشد [۲۸]. از این رو، با توجه به مقادیر P مندرج در جداول فوق‌الذکر ملاحظه می‌شود که عبارت رگرسیون، مؤثر و عبارت عدم برازش، غیرمؤثر است. از این رو، توانایی مدل برازش یافته در توصیف و پیش‌بینی تغییرات متغیرهای پاسخ به عنوان تابعی از متغیرهای ورودی، مورد تأیید قرار می‌گیرد. مانده به صورت تفاضل پاسخ اندازه‌گیری شده در آزمون تجربی و پاسخ پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیون، تعریف می‌شود. برای آزمون صحت توزیع نرمال مانده‌ها از نمودار احتمال نرمال استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، مانده‌ها در هر دو نمودار، عموماً از یک خط راست پیروی می‌کنند و شواهدی مبنی بر غیرنرمال بودن و عدم تقارن وجود ندارد.

² Surface Plot

¹ Lack of Fit



شکل ۹- نمودار احتمال نرمال

$$\sqrt{MHD - 1.16} = 15.07 - 0.28N - 0.71S - 0.48D + 0.85P + 0.93ND \quad (۶)$$

با توجه به استخراج معادله رگرسیون، انتخاب ترکیب مناسبی از متغیرهای ورودی فرآیند برای دستیابی به ماکزیمم پارامتر MHD، وجود دارد. همان‌طور که در این رابطه مشاهده می‌شود، تأثیر خطی متغیرهای ورودی فرآیند بر پارامتر MHD به ترتیب اهمیت عبارتند از: اندازه ذرات تقویت‌کننده، نرخ پیشروی ابزار، قطر شانه ابزار و سرعت دورانی ابزار.

همان‌گونه که در شکل (۱۱-الف) نشان داده شده است، به کارگیری ابزار با کمترین قطر شانه در سرعت دورانی بالاتر موجب کاهش پارامتر MHD و در نتیجه کاهش سختی مناطق SZ، TMAZ و HAZ نسبت به فلز پایه می‌شود. یکی از دلایل وقوع این پدیده می‌تواند انحلال موضعی فازهای سخت و ایجاد پدیده نرم‌شدگی ناشی از افزایش دما در این مناطق (به ویژه SZ و TMAZ) باشد که غالباً در مورد آلیاژهای عملیات حرارتی‌پذیر رخ می‌دهد.

این در حالی است که به کارگیری ابزار با بیشترین قطر شانه در سرعت دورانی بالاتر موجب افزایش پارامتر MHD

افزایش نرخ سیلان ماده می‌شود که در پی آن، توزیع بهتری از ذرات تقویت‌کننده Al_2O_3 در زمینه Al_7075 ایجاد می‌شود. از سوی دیگر، افزایش سرعت دورانی از ۸۰۰ به ۱۲۰۰ دور بر دقیقه باعث کاهش استحکام تسلیم می‌شود. در این وضعیت، افزایش سرعت دورانی موجب افزایش دمای ماده (به ویژه در منطقه SZ) می‌شود که منجر به رشد دانه‌ها و درشت‌شدگی یا انحلال رسوبات خواهد شد.

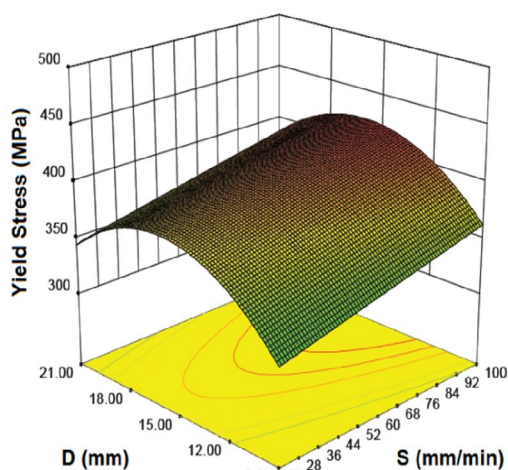
ارتباط استحکام تسلیم با دو پارامتر نرخ پیشروی و قطر شانه ابزار در شکل (۱۰-ب) نشان داده شده است. در این وضعیت، در صورتی که از ابزار با قطر شانه ۱۵ میلیمتر استفاده شود، افزایش نرخ پیشروی از ۲۰ به ۱۰۰ میلیمتر بر دقیقه باعث افزایش استحکام تسلیم می‌شود. در این حالت، کاهش نرخ پیشروی ابزار موجب افزایش مدت زمان تماس ابزار با قطعه‌کار می‌شود که منجر به افزایش دمای منطقه اغتشاشی و انحلال و رشد دانه‌ها خواهد شد.

۸-۳- پارامتر MHD

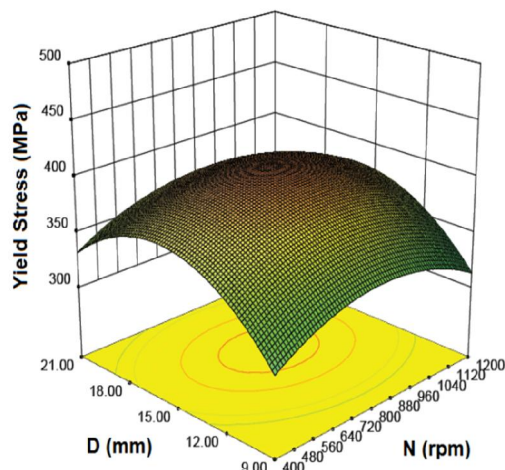
رابطه ۶، معادله رگرسیون پارامتر MHD را به صورت تابعی از متغیرهای ورودی کدگذاری شده، ارائه می‌کند:

تقویت‌کننده در شکل (۱۱-ب) نشان داده شده است. در این وضعیت، افزایش اندازه ذرات تقویت‌کننده موجب افزایش پارامتر MHD می‌شود که این تأثیر با کاهش قطر شانه ابزار، تقویت خواهد شد.

می‌شود. یکی از دلایل محتمل برای توجیه این وضعیت، اعمال نیروی برشی بیشتر به جنس ماده و در نتیجه، شکست و تقسیم ریزساختار ماده به دانه‌های ریزتر است. ارتباط پارامتر MHD با دو پارامتر قطر شانه ابزار و اندازه ذرات

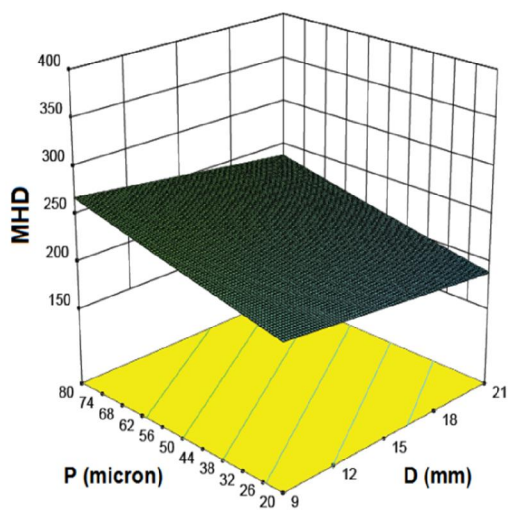


(ب) بررسی تأثیر D و S

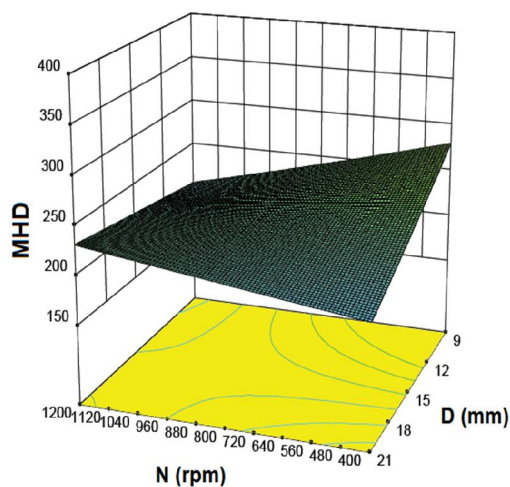


(الف) بررسی تأثیر D و N

شکل ۱۰- تأثیر متغیرهای ورودی بر استحکام تسلیم



(ب) بررسی تأثیر P و D



(الف) بررسی تأثیر N و D

شکل ۱۱- تأثیر متغیرهای ورودی بر پارامتر MHD

۹- نتیجه گیری

در این مقاله، مطالعه تجربی و تحلیل آماری پارامترهای موثر بر خواص مکانیکی کامپوزیت سطحی Al_7075/Al_2O_3 تولید شده در فرآیند FSP با استفاده از روش رویه پاسخ، به انجام رسید. نتایج مهم حاصل از این پژوهش به صورت زیر خلاصه می‌شود:

- نتایج حاصل از آنالیز واریانس نشان داد که پارامتر مرتبه اول S (نرخ پیشروی ابزار) و عبارت مرتبه دوم D^2 (مجذور قطر شانه ابزار) به عنوان عبارات موثر بر استحکام تسلیم نمونه‌ها هستند. همچنین پارامتر مرتبه اول P (اندازه ذرات تقویت کننده) و عبارت تعاملی N.D (حاصل ضرب سرعت دورانی در قطر شانه ابزار) به عنوان عبارات موثر بر میزان انحراف میکروسختی مقاطع کامپوزیتی نسبت به فلز پایه (پارامتر MHD)، معرفی شدند.
- صلاحیت و کفایت مدل‌های رگرسیون توسط آزمون عدم برازش و نمودار احتمال نرمال مورد بررسی قرار گرفت و توانایی مدل‌های برازش یافته در توصیف و پیش‌بینی تغییرات استحکام تسلیم و پارامتر MHD مقاطع کامپوزیتی، مورد تأیید قرار گرفت.
- معادلات رگرسیون حاصل از آنالیز واریانس برای پیش‌بینی مقادیر استحکام تسلیم و پارامتر MHD نمونه‌های کامپوزیتی به عنوان تابعی از اثرات خطی، تعاملی و سهمی متغیرهای ورودی فرآیند، استخراج گردید. از این‌رو، امکان انتخاب ترکیب مناسبی از متغیرهای ورودی فرآیند برای دستیابی به ماکزیمم استحکام تسلیم و پارامتر MHD، وجود دارد.
- معادله رگرسیون استحکام تسلیم نشان داد که تأثیر خطی متغیرهای ورودی فرآیند بر استحکام تسلیم به ترتیب اهمیت عبارتند از: نرخ پیشروی ابزار، قطر شانه ابزار، سرعت دورانی ابزار و اندازه ذرات تقویت کننده.
- معادله رگرسیون پارامتر MHD نشان داد که تأثیر خطی متغیرهای ورودی فرآیند بر پارامتر MHD به ترتیب اهمیت عبارتند از: اندازه ذرات تقویت-

کننده، نرخ پیشروی ابزار، قطر شانه ابزار و سرعت دورانی ابزار.

- بررسی نمودارهای منحنی رویه پاسخ نشان داد که تنظیم مقادیر پارامترهای سرعت دورانی و قطر شانه ابزار در سطح میانه (۸۰۰ دور بر دقیقه و ۱۵ میلیمتر) منتج به دستیابی به ماکزیمم استحکام تسلیم نمونه کامپوزیتی می‌شود. همچنین، افزایش نرخ پیشروی ابزار از ۲۰ الی ۱۰۰ میلیمتر بر دقیقه، باعث افزایش استحکام تسلیم می‌شود. از سوی دیگر، به کارگیری ابزار با کمترین قطر شانه (۹ میلیمتر) در سرعت دورانی بالاتر موجب کاهش پارامتر MHD و در نتیجه کاهش سختی مناطق SZ، TMAZ و HAZ نسبت به فلز پایه می‌شود. همچنین، افزایش اندازه ذرات تقویت کننده از ۲۰ الی ۸۰ میکرون موجب افزایش پارامتر MHD می‌شود که این تأثیر با کاهش قطر شانه ابزار، تقویت خواهد شد.

۱۰- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از دانشگاه صنعتی شاهرود برای حمایت مالی از انجام این تحقیق در قالب طرح پژوهشی با کد ۱۷۰۵۷ قدردانی می‌نمایند.

۱۱- مراجع

- [1] Heinz A, Haszler A, Keidel C, Moldenhauer S, Benedictus R, Miller WS (2000) Recent development in aluminium alloys for aerospace applications. *Mat Sci Eng A* 280 (1): 102-107.
- [2] Williams JC, Starke EA (2003) Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta Mater* 51 (19): 5775-5799.
- [3] Esmaili A, Shaeri MH, Talafi Noghani M, Razaghian A (2018) Fatigue behavior of AA7075 aluminium alloy severely deformed by equal channel angular pressing. *J Alloy Compd* 757: 324-332.
- [4] Li JF, Peng ZW, Li CX, Jia ZQ, Chen WJ, Zheng ZQ (2008) Mechanical properties, corrosion behaviors and microstructures of 7075 aluminium alloy with various aging treatments. *T Nonferr Metal Soc* 18 (4): 755-762.
- [5] Shrivastava AK, Singh KK, Dixit AR (2018) Tribological properties of Al 7075 alloy and Al 7075 metal matrix composite reinforced with SiC,

- [20] Mishra RS, Ma ZY (2005) Friction stir welding and processing. *Mat Sci Eng R* 50 (1-2): 1-78.
- [21] Sharma V, Prakash U, Manoj Kumar BV (2015) Surface composites by friction stir processing: A review. *J Mater Process Tech* 224: 117-134.
- [22] Ahmadifard S, Kazemi Sh, Heidarpour A (2015) Fabrication of Al5083/TiO₂ surface composite by friction stir process and investigating its microstructural, mechanical and wear properties. *Modares Mechanical Engineering* 15 (12): 55-62. (in Persian)
- [23] Ahmadifard S, Roknian M, Tinati Seresht T, Kazemi Sh (2016) Fabrication of hybrid nanocomposite Al2024/Gr/ZrO₂ via FSP and evaluation effect role of hybrid ratio in mechanical and wear properties. *Modares Mechanical Engineering* 16 (6): 119-126. (in Persian)
- [24] Arun Babu N, Balu naik B, Ravi B, Rajkumar G (2018) Process parameter optimization for producing AA7075/WC composites by friction stir welding. *Mater Today-Proc* 5: 18992-18999.
- [25] Kumar S, Kumar A, Vanitha C (2019) Corrosion behaviour of Al 7075 /TiC composites processed through friction stir processing. *Mater Today-Proc* 15: 21-29.
- [26] Deore HA, Mishra J, Rao AG, Mehtani H, Hiwarkar VD (2019) Effect of filler material and post process ageing treatment on microstructure, mechanical properties and wear behaviour of friction stir processed AA 7075 surface composites. *Surf Coat Tech* 374: 52-64.
- [27] Jelokhani-Niaraki MR, Mostafa Arab NB, Naffakh-Moosavy H, Ghoreishi M (2016) The systematic parameter optimization in the Nd:YAG laser beam welding of Inconel 625. *Int J Adv Manuf Tech* 84 (9-12): 2537-2546.
- [28] Montgomery DC (2017) Design and analysis of experiments. 9th edn. John Wiley & Sons, ISBN 978-1-119-11347-8.
- [29] Myers RH, Montgomery DC, Anderson-Cook CM (2016) Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments. 4th edn. John Wiley & Sons, ISBN 978-1-118 91601-8.
- [30] Vahdati M, Mahdavejrad R, Amini S, Moradi M (2015) Statistical analysis and optimization of factors affecting the surface roughness in UVaSPF process using response surface methodology. *J Adv Mat Res* 3 (1): 15-28.
- [31] Mostafapour A, Kamali H, Moradi M (2017) Friction surfacing of AA7075-T6 deposition on AA2024-T351; Statistical modeling using response surface methodology. *Modares Mechanical Engineering* 17 (8): 224-230.
- [6] Knych T, Mamala A, Ścieżor W (2013) Effect of selected alloying elements on aluminium physical properties and its effect on homogenization after casting. *Mater Sci Forum* 765: 471-475.
- [7] Rosochowski A (2005) Processing metals by severe plastic deformation. *Sol St Phen* 101-102: 13-22.
- [8] Baradeswaran A, Elaya Perumal A (2014) Wear and mechanical characteristics of Al 7075/graphite composites. *Compos Part B-Eng* 56: 472-476.
- [9] Tsai MS, Sun PL, Kao PW, Chang CP (2009) Influence of severe plastic deformation on precipitation hardening in an Al-Mg-Si alloy: Microstructure and mechanical properties. *Mater Trans* 50 (4): 771-775.
- [10] Wawer K, Lewandowska M, Wieczorek A, Aifantis EC, Zehetbauer M, Kurzydowski KJ (2009) Grain refinement in 7475 aluminum alloy via high pressure torsion and hydrostatic extrusion. *Kovove Mater* 5: 325-332.
- [11] Sarkari Khorrami M, Kazeminezhad M, Kokabi AH (2012) Microstructure evolutions after friction stir welding of severely deformed aluminum sheets. *Mater Design* 40: 364-372.
- [12] Thomas WM (1991) Friction stir butt welding. *Int Patent No. PCT/GB92/02203*.
- [13] Ghiasvand A, Hassanifard S (2018) Numerical simulation of FSW and FSSW with pinless tool of AA6061-T6 Al alloy by CEL approach. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 8 (3): 65-75. (In Persian)
- [14] Mishra RS, Mahoney MW, McFadden SX, Mara NA, Mukherjee AK (1999) High strain rate superplasticity in a friction-stir processed 7075 Al alloy. *Scripta Mater* 41: 163-168.
- [15] Mironov S, Sato YS, Kokawa H (2019) Nanocrystalline titanium, Chapter 4: Friction-stir processing. Elsevier, ISBN 9780128145999: 55-69.
- [16] Gholami S, Emadoddin E, Tajally M, Borhani E (2015) Friction stir processing of 7075 Al alloy and subsequent aging treatment. *T Nonferr Metal Soc* 25: 2847-2855.
- [17] Abrahams R, Mikhail J, Fasihi P (2019) Effect of friction stir process parameters on the mechanical properties of 5005-H34 and 7075-T651 aluminium alloys. *Mat Sci Eng A* 751: 363-373.
- [18] Rao VR, Ramanaiah N, Sarcar MMM (2014) Fabrication and investigation on properties of TiC reinforced Al7075 metal matrix composites. *Appl Mech Mater* 592-594: 349-353.
- [19] Josyula SK, Narala SKR (2014) A brief review on manufacturing of Al-TiC MMC. *Adv Mat Res* 980: 62-68.

[34] AMSH6088: Heat Treatment of Aluminum Alloys, SAE International, <https://www.sae.org>.

[32] Design Expert software, version 11, <http://www.statease.com>.

[33] <http://www.matweb.com>