

بهینه‌سازی پارامترهای فرایند اصطکاکی اغتشاشی (FSP)، برای بهبود سختی و

مقاومت به سایش Al-2024 توسط روش سطح پاسخ

علی قربانیان، محمد حاتمی، مصطفی طهری

مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، دانشکده مهندسی، اسفراین، خراسان شمالی، ایران

فرید نعیمی

مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

(دریافت مقاله: ۹۶/۱۰/۲۶ - پذیرش مقاله: ۹۷/۰۵/۰۹)

چکیده

در این پژوهش به بررسی اثر پارامترهای مختلف فرایند اصطکاکی اغتشاشی (FSP) بر سختی و مقاومت به سایش Al-2024، مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور با استفاده از روش سطح پاسخ، برای سه پارامتر تاثیرگذار فرایند FSP که شامل سرعت چرخش پین، سرعت پیشروی پین و زاویه پین می‌باشند، پنج سطح در نظر گرفته شد. پاسخ‌های حداکثر سختی و حداقل نرخ سایش به عنوان عامل بهینه کننده انتخاب گردید. به منظور ارزیابی سختی نمونه‌های FSP شده از آزمون ریزسختی سنچ ویکرز تحت استاندارد ASTM-E384 و برای ارزیابی رفتار سایشی نمونه‌ها از آزمون سایش پین روی دیسک تحت استاندارد ASTM-G99 در بار ۵۰۰ گرم و مسافت ۱۰۰۰m استفاده شد. به منظور بررسی تاثیر فرایند FSP بر ریزساختار از میکروسکوپ نوری استفاده شد. نتایج نشان داد که سرعت چرخش پین و سرعت پیشروی پین، هم به صورت مستقیم روی متوسط سختی تاثیر گذار می‌باشند و هم با توان دوم خود. همچنین مشخص است که این دو عامل روی یکدیگر نیز تاثیر گذار می‌باشند و می‌توان این دو عامل را به صورت مستقل بررسی نمود. عامل زاویه پین تقریباً هیچ تاثیری روی متوسط سختی نداشته همچنین این عامل با هیچ کدام از دو عامل دیگر نیز در تقابل نمی‌باشد. پس از انجام فرایند بهینه سازی، سرعت پیشروی پین، سرعت چرخش پین و زاویه پین به ترتیب برای اصلاح سطحی آلیاژ آلومینیم Al-2024، ۲۸ mm/min، ۱۲۷۴rpm و ۲.۵ درجه بدست آمد. مقدار سختی و میزان کاهش وزن در آزمون سایش برای نمونه FSP شده با پارامترهای بهینه به ترتیب برابر ۱۵۴ ویکرز و ۹.۳mg بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، روش سطح پاسخ، Al-2024، سایش.

Optimization of Friction Stir Processing (FSP) Parameters for the Hardness and Wear Resistance Improvements Using Response Surface Methodology

Ali Ghorbanian, Mohammad Hatami1, Mostafa Tahari

Esfarayen University of Technology, Engineering Faculty, Esfarayen, North Khorasan, Iran

Farid Naeimi

Advanced material research center, department of material, Najafabad branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

(Received 16 January 2017, accepted 31 July 2018)

Abstract

In this research, the effect of different parameters in Friction Stir Processing (FSP) on hardness and wear resistance of Al-2024 is investigated. For this reason, five levels are considered for the three main parameters including pin rotating speed, pin traveling speed and pin angle using response surface methodology. The maximum hardness and minimum wear rates are considered as the responses for optimization. For evaluating the hardness (under the 300 gr loading) and wear behaviour of processed samples (under the 500 gr loading and 1000m sliding distance), ASTM-E384 standard micro-vickers hardness tests and ASTM-G99 standard pin on disk tests are used, respectively. For investigating the FSP effect on micro-structure, grain size and morphology, optical microscopy is used. The results show that pin rotating speed and traveling speed have directly effect on the average hardness and also have a second power index relation on it. Furthermore it is obvious that these two parameters have interaction on each other and able to study them separately. Pin angle parameter had not any effect on the average hardness approximately and also no interaction by other two parameters. After optimizing process, the optimized values for pin rotating speed, pin traveling speed and pin angle for the Al-2024 were 28mm/min, 1274 rpm and 2.5 degree, respectively. Hardness value and weight reduction in wear test for processed case in optimized case were 154 vickers and 9.3mg.

Keywords: FSP, Al-2024, optimization, RSM.

E-mail of Corresponding author: m.hatami2010@gmail.com.

مقدمه

امروزه آلیاژهای آلومینیم به دلیل دانسیته پایین و نسبت استحکام به وزن بالا در صنایع هوا فضا و اتومبیل سازی کاربرد وسیعی دارند [۱]. با این وجود مقاومت ضعیف این آلیاژها به سایش یک از مشکلات اساسی این آلیاژها در کاربردهای صنعتی خود هستند [۲].

یکی از راه‌هایی که امروزه برای افزایش مقاومت به سایش این آلیاژها استفاده می‌شود کامپوزیتی کردن این آلیاژها با ذرات سرامیکی است [۳]. ساخت اینگونه کامپوزیت‌های زمینه فلزی همچنین باعث افزایش استحکام، مدول الاستیک و افزایش مقاومت به خزش و خستگی می‌شود [۴]. اما وجود این ذرات ترد سرامیکی در زمینه نرم آلومینیم باعث کاهش انعطاف‌پذیری این آلیاژها می‌شود [۵]. با توجه به اینکه سایش یک پدیده مخرب سطحی است، بنابراین اصلاح سطحی و کامپوزیت سازی سطحی در آلیاژهای آلومینیم برای افزایش مقاومت به سایش آنها بدون داشتن اثرات مخرب نظیر کاهش انعطاف‌پذیری که در کامپوزیت سازی کل آلیاژ اتفاق می‌افتد، می‌تواند عملکرد قطعات ساخته شده از این آلیاژها را تا مقدار زیادی بهبود بخشد [۶].

در سالهای اخیر روش‌های زیادی مانند ذوب سطحی توسط پرتوهای پر انرژی و پاشش حرارتی برای برای بهبود خواص سطحی قطعات مورد استفاده قرار گرفته است [۷-۱۳]. اما در این روش‌ها مشکلاتی مانند عدم توزیع مناسب ذرات کامپوزیتی در زمینه، وجود واکنش‌های احتمالی بین ذرات تقویت کننده و زمینه و عدم چسبندگی پوشش به زیرلایه باعث می‌شود تا استفاده از روش‌های مناسب‌تر که این مشکلات را نداشته باشد، احساس شود. در دهه‌های اخیر روش جدیدی برای ایجاد کامپوزیت سطحی در حالت جامد بوجود آمده است که در آن حرارت ناشی از اصطکاک بین پین مصرف نشدی و قطعه آلومینیمی دمای قطعه کار را افزایش می‌دهد و آن را به دمای مناسب برای تغییر شکل پلاستیک می‌رساند [۱۷-۲۳].

[۱۵]. به دلیل شباهت این روش به جوشکاری حالت جامد اصطکاکی اغتشاشی (FSW) به این روش فرایند اصطکاکی اغتشاشی (FSP) می‌گویند.

در اثر چرخش پین، علاوه بر افزایش دمای قطعه کار، محل چرخش پین به شدت اغتشاش یافته و دچار تغییر شکل پلاستیک شدید می‌شود. از طرف دیگر با اضافه کردن ذرات سرامیکی به منطقه اغتشاش، این ذرات با زمینه فلزی مخلوط شده و به خوبی در این زمینه توزیع می‌گردند. در این روش برخلاف روش‌های ذوبی در فصل مشترک بین ذرات سرامیکی و زمینه آلومینیم هیچ واکنش ناخواسته‌ای اتفاق نمی‌افتد [۱۸].

در طی فرایند FSP ذرات پودر در جریان تغییر شکل پلاستیک فلز به دام می‌افتد و به همراه فلز سیلان می‌یابد که همین امر باعث توزیع یکنواخت ذرات پودر در زمینه فلزی می‌شود [۱۹]. از طرف دیگر وجود تغییر شکل پلاستیک شدید و همچنین افزایش دما باعث بوجود آمدن پدیده تبلور مجدد می‌شود که منجر به تشکیل ساختاری ریزدانه در منطقه اغتشاش می‌شود. این دو پدیده باعث می‌شود که سختی و خواص سایشی این ناحیه به طور چشمگیری افزایش یابند. از مهمترین عواملی که تعیین کننده این اثرات در منطقه اغتشاش هستند، پارامترهای FSP می‌باشد. تا کنون محققین تلاش‌های زیادی را برای پی بردن به اثرات پارامترهای FSP بر سیلان فلز، توزیع ذرات تقویت کننده، ریزساختار و بالطبع آن بر خواص مکانیکی و سایشی انجام داده‌اند [۲۰-۲۲]. به منظور بررسی اثر پارامترهای FSP بر خواص سطحی قطعه، برخی از محققین از روش‌های سنتی استفاده می‌نمایند، به این صورت که همه پارامترها را ثابت در نظر می‌گیرند و فقط یک پارامتر را تغییر می‌دهند. اما در این روش تقابل بین پارامترها در نظر گرفته نمی‌شود و از نظر زمانی و اقتصادی مقرون به صرفه نیستند. به همین دلیل این روش، برای بدست آوردن پارامترهای بهینه، روش مناسبی نمی‌باشد [۲۳].

مطابق طرح ایجاد شده ۳- بررسی روابط آماری و ریاضی با توجه به داده‌های جمع‌آوری شده ۴- بررسی و ارزیابی مدل ریاضی ارائه شده ۵- بررسی ضرورت و احتمال تغییر پارامترها در جهت منطقه بهینه ۶- بدست آوردن مقدار بهینه برای هر یک از متغیرهای تصمیم‌تاثیر گذار [۲۷]. در این پژوهش سعی شده است که تاثیر پارامترهای فرایند FSP بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار آلومینیم ۲۰۲۴ با استفاده از روش RSM مورد ارزیابی قرار گیرد.

روش تحقیق

مواد اولیه

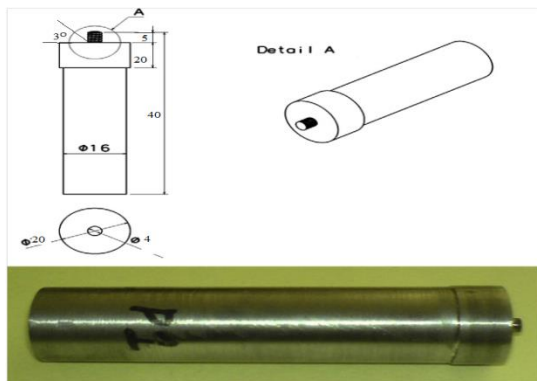
در این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ به شکل ورق و تحت ابعاد $10 \times 70 \times 20$ میلی‌متر که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است، استفاده شد. جهت انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی از دستگاه فرزکاری با استفاده از پارامترهایی که توسط روش سطح پاسخ بدست آمدند، استفاده گردید. ابزار مورد استفاده در این تحقیق فولاد گرم کار H13 با مشخصات قطر شانه ۲۰ میلی‌متر، ارتفاع شانه ۲۰ میلی‌متر، قطر پین ۴ میلی‌متر، و ارتفاع پین ۵ میلی‌متر و زاویه بین پین و شانه ۳ درجه استفاده شده است، همچنین بر روی پین رزوه‌هایی به صورت چپ گرد ایجاد شد. شکل ۱ شماتیکی از پین مورد استفاده در این فرایند را نشان می‌دهد. پارامترهای فرایند اصطکاکی اغتشاشی شامل سرعت چرخش و سرعت پیش‌روی و زاویه حمله در دو سطح حداقل و حداکثر در نظر گرفته شدند که با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی پنج سطح مختلف بدست آمده تا با استفاده از این روش به بهترین پارامتر مناسب برای فرایند اصطکاکی اغتشاشی این آلیاژ دست یافت که در ادامه این روش به صورت کامل توضیح داده شده است. از هر کدام از نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی شده در طی شرایط مختلف نمونه‌هایی تهیه و سپس مانت شدند. پس از سمباده زنی نمونه‌ها از شماره ۶۰ تا ۵۰۰۰ و پولیش مکانیکی با پودر آلومینا با ابعاد ۰.۳ در محلول کلر با ترکیب ($H_2O=95ml$ ، $HF=1ml$ ، $HCl=1.5ml$) و

در سال‌های اخیر پژوهشگران برای بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر فرایندهای اصطکاکی اغتشاشی از روش‌های بهینه‌سازی متنوعی مانند روش تاگوچی، سطح پاسخ (RSM) و شبکه عصبی استفاده نموده‌اند [۲۵-۲۳].

اولین گام از رویکرد پیشنهادی برای بهینه‌سازی پارامترها، طراحی آزمایش مناسب است. هدف از اجرای طراحی آزمایش به دست آوردن حداکثر اطلاعات ممکن با کمترین تعداد آزمایش است. به وسیله طراحی آزمایش، مهندسی بهینه‌ترین متغیرها را با تاثیر گذار بر فرایندها را شناسایی کرده و سطوح بهینه آنها را تعیین می‌کنند. یک آزمایش مجموعه‌ای از تلاش‌های برنامه‌ریزی شده می‌باشد که در آن متغیرهایی که گمان می‌رود بر اهداف تاثیر بگذارند، به صورت سیستماتیک تغییر می‌یابند و خروجی حاصل از این تغییرات (مقادیر اهداف) ثبت می‌شود. شیوه‌های گوناگونی برای انجام این آزمایش‌ها وجود دارد. از جمله؛ طرح‌های فاکتوری کامل طرح‌های فاکتوری بخشی، عمده برتری طرح‌های فاکتوری کامل در به دست آمدن اطلاعات از همه متغیرهای تصمیم و روابط بین آنها است از طرفی با افزایش تعداد فاکتورها، تعداد آزمایش‌ها به طور نمایی افزایش می‌یابند و کارایی روش پایین می‌آید. اما طرح‌های بخشی دارای این مزیت است که با تعداد آزمایشات کمتر و در نتیجه هزینه و زمان کمتری می‌توان داده‌های مربوط را جمع‌آوری و تحلیل کرد.

متدولوژی سطح پاسخ (RSM) یکی از روش‌های بسیار پرکاربرد به منظور بهینه‌سازی متغیرهای پاسخ در علوم مختلف می‌باشد، RSM با استفاده از ترکیب یک سری مدل‌های ریاضی و آماری تاثیر پارامترهای مختلف روی متغیرهای پاسخ را بررسی می‌کند، همچنین قابلیت ایجاد معادله‌های رگرسیونی درجه دو به منظور بهینه‌سازی متغیرهای پاسخ را دارا می‌باشد [۲۶].

متدولوژی سطح پاسخ از شش مرحله اصلی تشکیل شده است که عبارتند از: ۱- انتخاب متغیرهای تصمیم اصلی ۲- انتخاب یک طرح آزمایشات مناسب و انجام آزمایشات



شکل ۱. شماتیک پین مورد استفاده برای فرآیند FSP.

طراحی آزمایشات

طرح استفاده شده در این تحقیق با توجه به سه متغیر تصمیم سرعت چرخش پین، سرعت پیشروی و زاویه حمله در جدول ۲ قابل مشاهده می باشد در طرح فوق از یک نقطه مرکزی نیز استفاده شده است.

جدول ۲. طراحی آزمایش بدست آمده از روش RSM برای سه متغیر

سرعت چرخش پین، سرعت پیشروی و زاویه حمله

شماره آزمایش	ترتیب آزمایش	سرعت چرخش پین	سرعت پیشروی	زاویه حمله
۱	۱۷	-۱	-۱	-۱
۲	۸	۱	-۱	-۱
۳	۲۰	-۱	۱	-۱
۴	۵	۱	۱	-۱
۵	۱۶	-۱	-۱	۱
۶	۱۳	۱	-۱	۱
۷	۲	-۱	۱	۱
۸	۱۱	۱	۱	۱
۹	۱۰	-۲	۰	۰
۱۰	۱۵	۲	۰	۰
۱۱	۴	۰	-۲	۰
۱۲	۱۲	۰	۲	۰
۱۳	۳	۰	۰	-۲
۱۴	۹	۰	۰	۲
۱۵	۱۴	۰	۰	۰

سطوح انتخاب شده برای پارامترهای ذکر شده در بالا، به گونه‌ای در نظر گرفته شد که پارامترهای داده شده در فرایند FSP محدوده وسیعی را در نظر بگیرد. سطوح پارامترهای مورد استفاده در جدول ۳ ارائه شده است.

اچ شدند. آزمون سختیسنجی کامپوزیت ایجاد شده با استفاده از دستگاه ریزسختیسنج ویکرز ساخت شرکت کوپا استفاده و مطابق با استاندارد ASTM-E384 تحت بار ۳۰۰ گرم و مدت زمان ۱۰ ثانیه انجام شد و همچنین بررسی های ریزساختاری در مقطع اصطکاکی اغتشاشی شده توسط میکروسکوپ نوری انجام گرفت. بررسی رفتار تریبولوژیکی پوشش ها با استفاده از استاندارد ASTM-G99 انجام شد. اساس این روش حرکت یک گلوله بر روی یک دیسک می باشد. در این آزمون، نرخ سایش مواد از طریق اندازه گیری کاهش وزن محاسبه شد. در این آزمون پین مورد استفاده با استفاده از ایرکات از نمونه های FSP شده تهیه شد و جفت سایشی دیسکی به قطر ۵cm از فولاد 100Cr6 که کوئینچ شده و به سختی HV ۸۳۰ رسیده بود، انتخاب گردید. دیسک متحرک با سرعت خطی ۰/۰۷m/s دوران می کرد. آزمون سایش در بار ۵۰۰ گرم و در مسافت ۱۰۰۰ m و در رطوبت هوای ۲۷±۶ درصد و دمای ۲۲±۴°C انجام گرفت. شایان ذکر است در این تحقیق چون فقط میزان کاهش وزن نمونه در انتهای آزمون سایش مورد نیاز بود، اندازه گیری کاهش وزن نمونه ها فقط در پایان ۱۰۰۰ متر صورت پذیرفت.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴

عنصر	Al	Cu	Mg	Mn	Zn	Fe	Si
درصد وزنی	پایه	۴/۳	۱/۴۲	۵	۸/۷	۱	۱/۶

جدول ۳. سطوح در نظر گرفته شده برای پارامترهای مورد بررسی در

فرایند RSM

حد بالا	نقطه مرکزی	حد پایین	علامت اختصاری	متغیر پاسخ
۱۳۰۰	۱۱۵۰	۱۰۰۰	R	سرعت چرخش
۳۰	۲۵	۲۰	S	سرعت پیشروی
۳	۲.۵	۲	A	زاویه حمله

با توجه به اینکه در طرح معرفی شده برای هر یک از متغیرهای تصمیم از مقادیر کد شده استفاده می شود. در زیر روابط مربوط به تبدیل این متغیرها نشان داده شده است.

$$R(\text{coded}) = \frac{RPM - 1150}{150}$$

$$S(\text{coded}) = \frac{S - 25}{5}$$

$$A(\text{coded}) = \frac{A - 2.5}{0.5}$$

در معادلات بالا مخرج کسرها از رابطه $\frac{x_{upper} - x_{lower}}{2}$ و صورت کسرها از رابطه $\frac{x_{upper} + x_{lower}}{2} - X$ به دست می آیند.

متدولوژی سطح پاسخ

در این مرحله لازم است متغیرهای تاثیر گذار بر تابع هدف های مختلف مسئله شناسایی شود تا ارتباطی مناسب بین متغیرهای تصمیم و اهداف مورد نظر برقرار شود. برای این امر تکنیک سطح پاسخ مورد استفاده قرار گرفته است. این تکنیک شامل مجموعه روش هایی است که سعی در شناخت و درک ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی سیستم دارد. در واقع در این تکنیک طراح به دنبال برقراری یک ارتباط بهینه بین مجموعه متغیرهای تاثیر گذار و متغیرهای پاسخ است [۲۸]. از این رو در این مرحله یک تابع پیش بینی مناسب برای هر یک از اهداف نسبت به متغیرهای تصمیم به وسیله روش RSM به دست می آید. فرمت کلی معادلات برآورد شده از متدولوژی سطح پاسخ را می توان در رابطه شماره مشاهده نمود.

نتایج

با توجه با آزمایشات طراحی شده و همچنین متدولوژی سطح پاسخ برای هر کدام از آزمایشات طراحی شده به منظور بدست آوردن متغیرهای پاسخ (متوسط سختی، نرخ سایش) چهار بار تست انجام شده است که اطلاعات بدست آمده در جدول ۴ نمایش داده شده است. داده های وارد شده مقدار متوسط برای چهار بار انجام هر آزمایش می باشد.

جدول ۴. پارامترهای بدست آمده برای هر کدام از آزمایشات طراحی شده و نتایج حاصل از آزمون های سختی سنجی و سایش برای این

آزمایشات

شماره آزمایش	ترتیب آزمایش	سرعت چرخش	سرعت پیشروی	زاویه حمله	متوسط سختی (HV)	کاهش وزن (mg)
۱	۱۷	۱۰۰۰	۲۰	۲/۰	۸۱	۱۶/۷
۲	۸	۱۳۰۰	۲۰	۲/۰	۱۰۱	۱۵/۶
۳	۲۰	۱۰۰۰	۳۰	۲/۰	۷۴	۱۷/۹
۴	۵	۱۳۰۰	۳۰	۲/۰	۱۳۹	۹/۸
۵	۱۶	۱۰۰۰	۲۰	۳/۰	۹۲	۱۶/۱
۶	۱۳	۱۳۰۰	۲۰	۳/۰	۸۲	۱۷/۲
۷	۲	۱۰۰۰	۳۰	۳/۰	۷۲	۱۸/۳
۸	۱۱	۱۳۰۰	۳۰	۳/۰	۱۴۴	۹
۹	۱۰	۸۵۰	۲۵	۲/۵	۱۰۱	۱۷/۱
۱۰	۱۵	۱۴۵۰	۲۵	۲/۵	۱۱۹	۱۴/۳
۱۱	۴	۱۱۵۰	۱۵	۲/۵	۸۱	۱۶/۴
۱۲	۱۲	۱۱۵۰	۳۵	۲/۵	۱۱۴	۱۵/۱
۱۳	۳	۱۱۵۰	۲۵	۱/۵	۱۰۱	۱۴/۳
۱۴	۹	۱۱۵۰	۲۵	۳/۵	۱۲۶	۱۳/۲
۱۵	۱۴	۱۱۵۰	۲۵	۲/۵	۱۴۲	۱۰/۰۸

$$D = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1, i < j}^4 \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon$$

تحلیل واریانس

به منظور بررسی نتایج بدست آمده از تحلیل واریانس برای هر یک از متغیرهای پاسخ و همچنین تقابل آن‌ها بر یکدیگر استفاده می‌نمایم با توجه به اینکه در استفاده از نتایج تحلیل واریانس باید خطاهای ناشی از برآورد متغیرهای پاسخ دارای شرایطی باشند ابتدا شرایط لازم برای صحت داده‌های استفاده شده را بررسی می‌نمایم. از مهم‌ترین عوامل بررسی شده نرمال بودن خطاهای ایجاد شده می‌باشد. برای این منظور نمودار نرمال درصد خطاهای ایجاد شده را رسم نموده ایم که شکل ۲ این مطلب را نمایش می‌دهد.

همانگونه که مشاهده می‌شود برای هر دو مورد متوسط سختی و همچنین نرخ سایش خطاهای ایجاد شده دارای توزیع نرمال نسبی می‌باشند که این امر با توجه به قرار گرفتن مقدار باقیمانده روی یک خط راست به خوبی قابل مشاهده می‌باشد

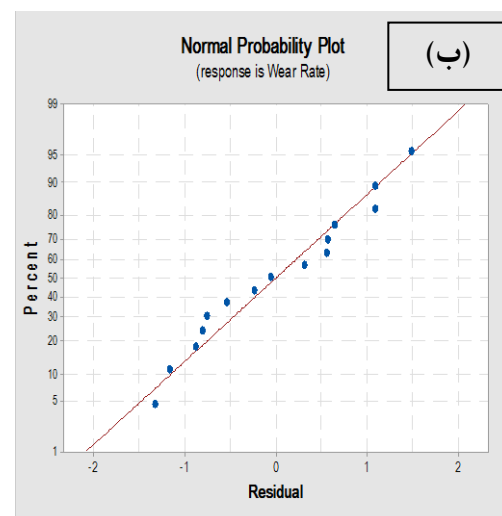
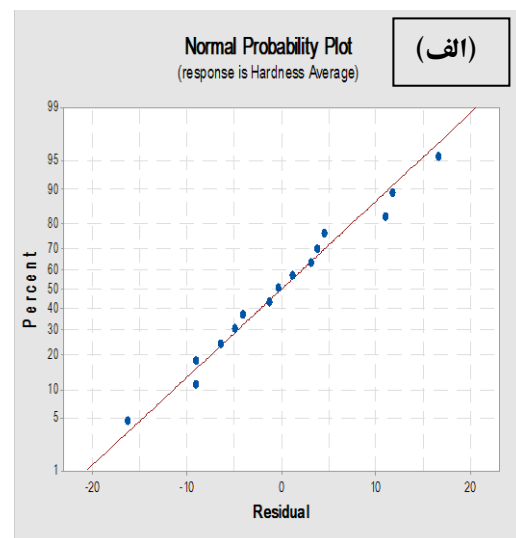
حال می‌توان با توجه به صحت نتایج بدست آمده از اطلاعات مربوط به تحلیل واریانس جهت بررسی عوامل تاثیر گذار و همچنین برآورد هر یک از متغیرهای پاسخ استفاده نمود جدول ۵ اطلاعات مربوط به تحلیل واریانس نتایج حاصل شده را نمایش می‌دهد.

جدول ۵. نتایج حاصل از تحلیل واریانس برای نتایج بدست آمده از

طراحی آزمایش

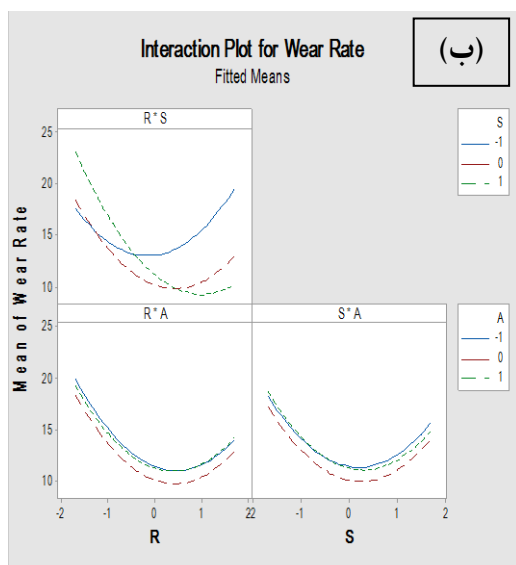
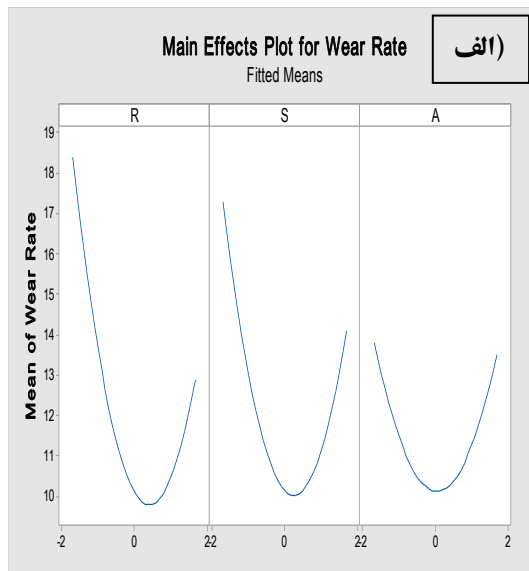
Term	Coeff	P-Value	Sig nificant	Coeff	P-Value	Sig nificant
Constant	143.3	0.000	بله	10.14	0.001	بله
R	12.98	0.023	بله	-1.619	0.010	بله
S	9.41	0.066	بله	-0.936	0.068	بله
A	2.71	0.528	خیر	-0.092	0.830	خیر
R*R	-13.11	0.081	بله	1.909	0.026	بله
S*S	-17.53	0.033	بله	1.927	0.025	بله
A*A	-11.87	0.105	خیر	1.219	0.101	خیر
R*S	15.88	0.029	بله	-2.175	0.009	بله
R*A	-2.88	0.606	خیر	0.125	0.822	خیر
S*A	1.37	0.803	خیر	-0.175	0.754	خیر

به منظور تحلیل بهتر نتایج نمودارها مربوط به بررسی مستقیم هر یک از عوامل و همچنین تاثیرات متقابل هر یک



شکل ۲. نمودار نرمال درصد خطاهای ایجاد شده برای پاسخ (الف) سختی، (ب) سایش.

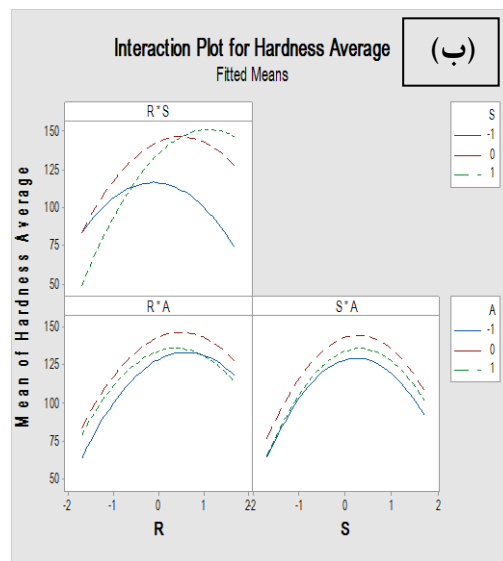
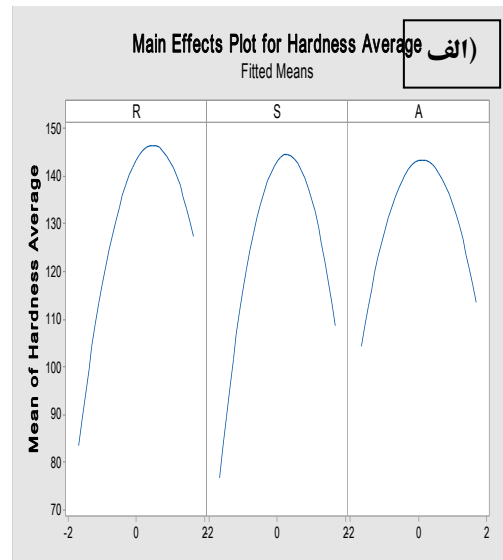
آن‌گونه که نتایج و نمودارها نمایش می‌دهند عامل زاویه تقریباً هیچ تاثیری روی متوسط سختی نداشته همچنین این عامل با هیچ کدام از دو عامل دیگر نیز در تقابل نمی‌باشد و در واقع می‌توان از این عامل کاملاً صرف نظر نمود.



شکل ۴. الف) تاثیر مستقیم و مستقل هر یک از عوامل و ب) تاثیر تقابلی آنها روی متغیر پاسخ سایش.

با توجه به نتایج تحلیل واریانس و همچنین نمودارهای شکل ۴ در مورد عوامل تاثیرگذار روی نرخ سایش می‌توان گفت مانند متوسط سختی در این متغیر پاسخ نیز عوامل سرعت چرخش و همچنین سرعت پیشروی کاملاً

از عوامل روی هر یک از متغیرهای پاسخ رسم شده است که اشکال شماره ۳ و ۴ آن‌ها را نمایش می‌دهد.



شکل ۳. الف) تاثیر مستقیم و مستقل هر یک از عوامل و ب) تاثیر تقابلی آنها روی متغیر پاسخ سختی.

همانگونه که به وضوح مشخص است و همچنین نتایج جدول شماره ۵ عوامل سرعت چرخش و سرعت پیشروی هم به صورت مستقیم روی متوسط سختی تاثیر گذار می‌باشند و هم با توان دوم خود. همچنین مشخص است که این دو عامل روی یکدیگر تاثیر گذار می‌باشند و می‌توان این دو عامل را به صورت مستقل بررسی نمود. همچنین

شکل ۵ خطوط کانتور مربوط به متوسط سختی و نرخ سایش را نمایش می‌دهد با توجه به اینکه هدف حداکثر کردن متوسط سختی و کمینه کردن نرخ سایش می‌باشد برای بدست آوردن یک پاسخ مناسب برای حداکثر کردن باید عامل سرعت چرخش و سرعت پیشروی در محدوده بین ۰ تا ۱ و یا در واقع در محدوده مثبت خود قرار داشته باشند و همچنین به منظور کمینه کردن نرخ سایش نیز باید این عوامل در محدوده بالای خود قرار داشته باشند. این عامل را می‌توان به افزایش شدت تغییر شکل پلاستیک و کارسختی بوجود آمده در طی فرایند نسبت داد [۲۳-۲۵]

بهینه‌سازی

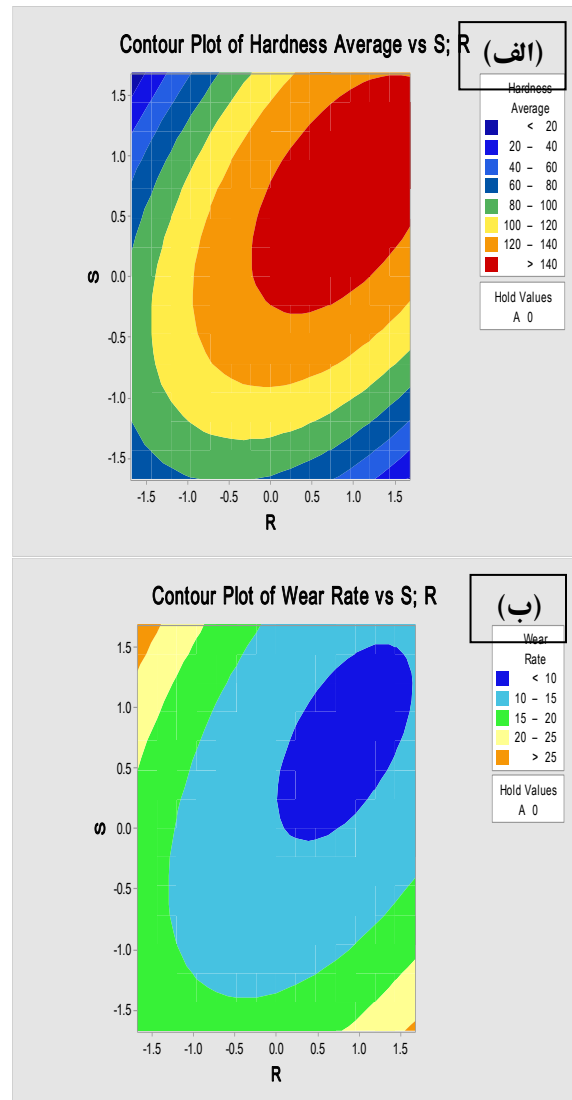
برای بدست آوردن نقطه بهینه ابتدا برای هر یک از متغیرهای پاسخ با استفاده از متدولوژی سطح پاسخ خطوط برآورد را بدست می‌آوریم که روابط ۲ و ۳ آن‌ها را نمایش می‌دهند.

$$\text{Hardness Average} = 143.3 + 12.98 R + 9.41 S - 13.11 R^2 - 17.53 S^2 + 15.88 R*S \quad (2)$$

$$\text{Wear Rate} = 10.14 - 1.619 R - 0.936 S - 0.092 A + 1.909 R^2 + 1.927 S^2 + 1.219 A^2 - 2.175 R*S \quad (3)$$

به منظور بهینه‌سازی دو متغیر پاسخ متوسط سختی و همچنین نرخ سایش می‌توان از انواع روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره استفاده نمود. هنگامی که رویه بهینه‌سازی شامل بیشتر از یک متغیر پاسخ باشد نمی‌توان به تنهایی و هرکدام از آنها را جداگانه بهینه‌سازی نمود [۲۹]. یکی از روش‌هایی که به صورت گسترده به منظور بهینه‌سازی چند هدفه مورد استفاده قرار گرفته است رویکرد تابع مطلوبیت می‌باشد [۲۹]. این رویکرد سعی بر آن دارد که به طور همزمان فاصله از جواب بهینه برای هر کدام از متغیرهای پاسخ را کمینه نماید. برای این منظور ابتدا با توجه به اینکه هدف کمینه کردن یا بیشینه کردن متغیر پاسخ باشد یک تابع مطلوبیت جداگانه برای هر یک از متغیرهای پاسخ تعریف می‌نماییم. اگر متغیر پاسخ

تاثیرگذار بوده ولی عامل زاویه به صورت مستقیم روی نرخ سایش تاثیری ندارد اما توان دوم آن روی نرخ سایش تاثیرگذار می‌باشد همچنین عامل سرعت پیشروی و سرعت چرخشی در تقابل بوده و به صورت مستقل قابل بررسی نمی‌باشند اما عامل زاویه با هیچ یک از این عوامل در تقابل نبوده و می‌توان آن را به صورت مستقل در نظر گرفت با توجه به اینکه دو عامل سرعت چرخش و سرعت پیشروی به صورت تقابلی روی هر یک از متغیرهای پاسخ تاثیرگذار می‌باشند می‌توان با رسم خطوط کانتور محدوده بهینه را برای هر کدام از این عوامل در جهت رسیدن به جواب بهینه بررسی نمود.



شکل ۵. خطوط کانتور مربوط به الف) متوسط سختی و ب) نرخ سایش.

برای هر از متغیرهای پاسخ تشکیل می‌دهیم که روابط شماره ۷ و ۸ آن‌ها را نمایش می‌دهد.

حال با توجه به تشکیل مطلوبیت جداگانه هر یک متغیرهای پاسخ می‌توان تابع مطلوبیت کل را با توجه به رابطه شماره ۶ تشکیل داد که رابطه شماره ۹ تابع مطلوبیت کل را نمایش می‌دهد لازم به ذکر است که برای هر دو متغیر پاسخ میزان اهمیت یک در نظر گرفته شده است. به منظور بهینه‌سازی تابع مطلوبیت کل و بهینه ساختن پارامترها از نرم‌افزار متلب استفاده شده است که جدول ۶ نتایج آن را نمایش می‌دهد.

برای بررسی صحت نتایج بدست آمده از فرایند بهینه سازی، با استفاده از پارامترهای بهینه نمونه نهایی تهیه شد. به جهت اینکه دقت دستگاه فرز مورد استفاده در این تحقیق به اندازه میزان اعشار بدست آمده در پارامترهای بهینه نبود، پارامترهای استفاده شده برای نمونه بهینه به نزدیکتر عدد صحیح گرد شده است. در ادامه آزمون‌های سختی سنجی و سایش بر روی آن انجام شد که نتایج آن در جدول ۷ نشان داده شده است.

بهینه‌سازی باشد از رابطه شماره ۴ و در صورت کمینه کردن متغیر پاسخ از رابطه شماره ۵ استفاده می‌نمایم. در این روابط L_i و U_i مقدار حد پایین و حد بالای هر یک از متغیرهای پاسخ را نمایش می‌دهد همچنین t و s میزان اهمیت هر یک از متغیرهای پاسخ را نمایش می‌دهد.

$$d_i(\hat{y}_i(x)) = \begin{cases} 0 & \text{اگر } \hat{y}_i(x) < L_i \\ \left(\frac{\hat{y}_i(x) - L_i}{U_i - L_i}\right)^s & \text{اگر } L_i \leq \hat{y}_i(x) \leq U_i \\ 1 & \text{اگر } \hat{y}_i(x) > U_i \end{cases} \quad (۴)$$

$$d_i(\hat{y}_i(x)) = \begin{cases} 1 & \text{اگر } \hat{y}_i(x) < L_i \\ \left(\frac{U_i - \hat{y}_i(x)}{U_i - L_i}\right)^t & \text{اگر } L_i \leq \hat{y}_i(x) \leq U_i \\ 0 & \text{اگر } \hat{y}_i(x) > U_i \end{cases} \quad (۵)$$

حالا به منظور بهینه کردن همزمان دو متغیر پاسخ تابع مطلوبیت کل را مطابق با رابطه شماره ۶ تشکیل می‌دهیم.

$$D = (d_1(x) \times d_2(x) \times \dots \times d_k(x))^{\frac{1}{k}} \quad (۶)$$

با توجه به معادله‌های برآورد که برای متوسط سختی و همچنین نرخ سایش را نمایش می‌دهد تابع مطلوبیت را

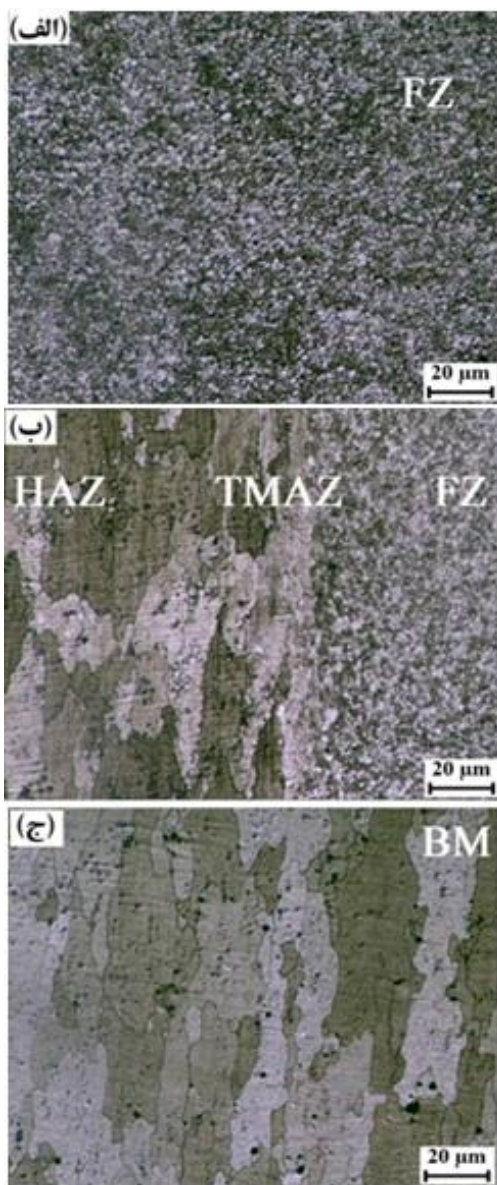
$d_i(HA) = \left(\frac{143.3 + 12.98 R + 9.41 S - 13.11 R^2 - 17.53 S^2 + 15.88 R * S - 72}{144 - 72}\right)$	(۷)
$d_i(WR) = \left(\frac{18 - 10.14 - 1.619 R - 0.936 S - 0.092 A + 1.909 R^2 + 1.927 S^2 + 1.219 A^2 - 2.175 R * S}{18 - 9}\right)$	(۸)
$D = \left[\left(\frac{143.3 + 12.98 R + 9.41 S - 13.11 R^2 - 17.53 S^2 + 15.88 R * S - 72}{144 - 72}\right) \cdot \left(\frac{18 - 10.14 - 1.619 R - 0.936 S - 0.092 A + 1.909 R^2 + 1.927 S^2 + 1.219 A^2 - 2.175 R * S}{18 - 9}\right) \right]^{\frac{1}{2}}$	(۹)

جدول ۶. نتایج حاصل از بهینه‌سازی تابع مطلوبیت کل و بهینه ساختن پارامترها

	مطلوبیت کل	متوسط سختی	نرخ سایش	سرعت چرخش	سرعت پیشروی	زاویه
بهینه‌سازی همزمان	۰.۹۹	۱۵۲.۲۲	۹.۱۳	۱۲۷۴۸	۲۸.۶۵	۲.۵۲
بهینه‌سازی متوسط سختی	-	۱۵۲.۳۹	-	۱۲۸۵.۰۵	۲۸.۳۱	۲.۵۲
بهینه‌سازی نرخ سایش	-	-	۹.۱۳	۱۲۷۴۸	۲۸.۶۵	۲.۵۲

دوم آن روی نرخ سایش تاثیرگذار می باشد همچنین عامل سرعت پیشروی و سرعت چرخش پین در تقابل بوده و به صورت مستقل قابل بررسی نمی‌باشند اما عامل زاویه با هیچ یک از این عوامل در تقابل نبوده و می توان آن را به صورت مستقل در نظر گرفت.

۴- انجام فرایند FSP با استفاده از پارامترهای بهینه بدست آمده، باعث شده که دانه‌های بسیار ریز و هم محور در منطقه اغتشاش بوجود آید که دارای سختی مناسب و مقاومت به سایش بسیار خوبی می‌باشند.



شکل ۶. تصاویر متالوگرافی از نمونه پارامترهای بهینه در مناطق الف) اغتشاشی، ب) فصل مشترک، ج) فلز پایه.

جدول ۷. نتایج بدست آمده از آزمون‌های سایش و سختی سنجی برای

نمونه FSP شده با استفاده از پارامترهای بهینه

نرخ سایش	متوسط سختی	زاویه	سرعت پیشروی	سرعت چرخش	نمونه با پارامترهای بهینه
۹,۳±۰,۲	۱۵۴±۳	۲/۵	۲۸/۶۵	۱۲۷۴/۸	

همانطور که مشاهده می‌شود نمونه بهینه شده از نظر سختی و مقاومت به سایش تفاوت کمی را با نتایج بدست آمده از نتایج بهینه سازی نشان داده است. به منظور بررسی میکروساختار نمونه اصطکاکی اغتشاشی شده، تصویر متالوگرافی نمونه تهیه شده با پارامترهای بهینه در شکل ۶ نشان داده شده است و با نمونه اولیه مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نمونه FSP شده دارای اندازه دانه بسیار کمتری نسبت به نمونه اولیه دارد. از طرف دیگر مشاهده می‌شود که دانه‌های ریز بوجود آمده در منطقه اغتشاشی کاملاً هم محور می‌باشند و کشیدگی دیده شده در نمونه اولیه را ندارند. این امر به پدیده‌های ترمو مکانیکی و تبلور مجدد اتفاق افتاده در حین فرایند اصطکاکی اغتشاشی نبت داده دهه است [۳۰]. براساس رابطه هال-پیچ همین امر باعث شده است خواص مکانیکی قطعه و مقاومت به سایش آن به شدت بهبود یابد [۳۱].

نتیجه‌گیری

۱- سرعت چرخش پین و سرعت پیشروی پین، هم به صورت مستقیم روی متوسط سختی تاثیر گذار می باشند و هم با توان دوم خود. همچنین مشخص است که این دو عامل روی یکدیگر نیز تاثیر گذار می باشند و می توان این دو عامل را به صورت مستقل بررسی نمود.

۲- عامل زاویه حمله پین تقریباً هیچ تاثیری روی متوسط سختی نداشته همچنین این عامل با هیچ کدام از دو عامل دیگر نیز در تقابل نمی‌باشد.

۳- سرعت چرخش پین و سرعت پیشروی پین، به صورت مستقیم بر نرخ سایش تاثیرگذار است، ولی عامل زاویه به صورت مستقیم روی نرخ سایش تاثیری ندارد. اما توان

- Petri Vuoristo, *Tribology of FeVCrC coatings deposited by HVOF and HVAF thermal spray processes*, *Wear*, 394–395 (2018) 113-133.
12. Robert J.K. Wood, Stephen Herd, Mandar R. Thakare, *A critical review of the tribocorrosion of cemented and thermal sprayed tungsten carbide*, *Tribology International*, 119(2018) 491-509.
13. Giovanni. Bolelli, Marcello. Bursi, Luca, Lusvarghi, Tiziano. Manfredini, *Tribology of FeVCrC coatings deposited by HVOF and HVAF thermal spray processes*, *Wear*, 394–395(2018) 113-133.
14. Yuping Wu, Sheng Hong, Jianfeng Zhang, Zhihua He, *Microstructure and cavitation erosion behavior of WC-Co-Cr coating on 1Cr18Ni9Ti stainless steel by HVOF thermal spraying*, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 32(2012) 21-26.
15. K. Colligan, *Material Flow Behavior during Friction Stir Welding of Aluminum*, *Weld. J.* 78 (1999) 229–234.
16. R.S. Mishra, M.W. Mahoney, *Friction Stir Processing: A New Grain Refinement Technique to Achieve High Strain Rate Superplasticity in Commercial Alloys*, *Materials Science Forum* 357-359(2001), 507-514.
17. Seidel T.U., Reynolds A.P., *Visualization of the material flow in AA2195 friction stir welds using a marker insert technique*, *Mater Trans A*, 32(2001) 2879–2887.
18. Mishra R.S., Ma Z.Y., *Friction stir welding and processing*, *Mater Sci Eng R* 50(2005) 1–78.
19. H.G. Rana, V. J. Badhek, A. Kumar, *Fabrication of Al7075/B4C surface composite by novel Friction Stir Processing (FSP) and investigation on wear properties*, *Procedia Technology* 23 (2016) 519 – 528.
20. W. B. Lee, *Mechanical properties related to microstructural variation of 6061 Al alloy joints by friction stir welding*, *Material Transactions*, 2004, 45(5): 1700-1705.
21. K. Elangovan, V. Balasubramanian, *Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminum alloy*, *Journal of Materials Science Engineering A*, (2007) 459: 7-18.
22. K. Elangovan, V. Balasubramanian, *Effect of tool pin profile and axial force on the*
1. H. Bakes, D. Benjamin, C.W. Kirkpatrick (Eds.), *Metals Handbook*, vol. 2, ASM, Metals Park, OH, (1979) 3–23.
2. Y. Wan, Q.J. Xue, *Effect of phosphorus-containing additives on the wear of aluminum in the lubricated aluminum-on-steel contact*, *Tribol. Lett.* 2 (1996) 37–45.
3. M. Kok, K. Ozdin, *Wear resistance of aluminium alloy and its composites reinforced by Al₂O₃ particles*, *Journal of Materials Processing Technology* 183 (2007) 301–309.
4. G. Ricciardi, M. Cantello, G. Mollino, W. Varani, E. Garlet, *Proceedings of 2nd International Seminar on Surface Engineering with High Energy Beam*, Science and Technology, CEMUL-IST, Lisbon, Portugal, (1989) 415-423.
5. T.W. Clyne, P.J. Withers, *An Introduction to Metal Matrix Composites*, Cambridge University Press, Cambridge, (1993).
6. E. Rabinowicz, *Friction and Wear of Materials*, John Wiley and Sons, New York, (1965).
7. D. Pantelis, A. Tissandier, P. Manolatos, P. Ponthiaux, *Formation of wear resistant Al-SiC surface composite by laser melt-particle injection process*, *Mater. Sci. Technol.* 11 (1995) 299.
8. Anne Jung, Anja Buchwalder, Eugen Hegelmann, Philipp Hengst, Rolf Zenker, *Surface engineering of spray-formed aluminium-silicon alloys by plasma nitriding and subsequent electron beam remelting*, *Surface and Coatings Technology*, 335 (2018) 166-172.
9. Shengfeng Zhou, Yongbo Xu, Bangquan Liao, Yajuan Sun, Xiaoqin Dai, Jiaoxi Yang, Zhengyang Li, *Effect of laser remelting on microstructure and properties of WC reinforced Fe-based amorphous composite coatings by laser cladding*, *Optics & Laser Technology*, 103 (2018) 8-16.
10. Zhaoyue Dong, Da Li, Youhong Sun, Ming Qian, *Effects of laser remelting on CNT's behavior, microstructure and hardness of CNT-doped Fe-base composite*, *Surface and Coatings Technology*, 335 (2018) 140-147.
11. Giovanni Bolelli, Marcello Bursi, Luca Lusvarghi, Tiziano Manfredini, Ville Matikainen, Rinaldo Rigon, Paolo Sassatelli,

- formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminum alloy*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 38 (2008) 285–295.
23. A. K. Lakshminarayanan, V. Balasubramanian, *Process parameters optimization for friction stir welding of RDE-40 aluminium alloy using Taguchi technique*, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 18(2008)548-554.
24. M. Salehi, M. Saadatmand, J. Aghazadeh Mohandesi, *Optimization of process parameters for producing AA6061/SiC nanocomposites by friction stir processing*, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 22(2012) 1055-1063.
25. A. K. Lakshminarayanan, V. Balasubramanian, *Comparison of RSM with ANN in predicting tensile strength of friction stir welded AA7039 aluminium alloy joints*, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 19(2009) 9-18.
26. Dean, A., Voss, D., & Dragulji, D., *Response surface methodology. In Design and analysis of experiments*, Springer International Publishing, (2017) 565-614.
27. Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S., & Escaleira, L. A., *Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry*, Talanta, 76(5)(2008)965-977.
28. Bhutta KS, Huq F. *Supplier selection problem: a comparison of the total cost of ownership and analytical hierarchy process*. Supply Chain Management 7(3–4)(2002)126–35.
29. Candiotti, L. V., De Zan, M. M., Cámara, M. S., & Goicoechea, H. C. *Experimental design and multiple response optimization. Using the desirability function in analytical methods development*, Talanta, 124(2014) 123-138.
30. M. Barmouz, P. Asadi M.K. Besharati Givi, M. Taherishargh, *Investigation of mechanical properties of Cu/SiC composite fabricated by FSP: Effect of SiC particles' size and volume fraction*, Materials Science and Engineering A 528 (2011) 1740–1749.
31. Ranjit Bauri, Devinder Yadav, *Metal Matrix Composites by Friction Stir Processing*, Chapter 3–Processing Metal Matrix Composite (MMC) by FSP (2018) 31–55.