



بررسی پارامترهای موثر بر روی کامپوزیت $Al_{6061}/Al_2O_3.WC.SiC$ ساخته شده با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

حسین لشگری^۱، محمد حسین پور گلولو^۲، امیر مومنی^۳، سروش پرویزی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲- دانشیار، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۳- استادیار، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

۴- استادیار، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مواد و فناوریهای نوین، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

*تهران، صندوق پستی ۱۶۷۸۵-۱۳۶ parvizi@sru.ac.ir

چکیده

فرآوری اصطکاکی اغتشاشی، یک فرآیند جدید برای اصلاح ریزساختار، خواص مکانیکی مواد و تولید کامپوزیت سطحی محسوب می‌شود. در این پژوهش، از این فرآیند برای تولید کامپوزیت سطحی زمینه فلزی آلومینیوم ۶۰۶۱ با ذرات تقویت کننده کاربید سیلیسیم، کاربید تنگستن و اکسید آلومینیوم با اندازه ذرات میانگین 10 ± 4 میکرومتر استفاده شد. ابتدا ترکیبی از سرعت پیشروی و دورانی بر روی نمونه‌ها اعمال شد. سپس نمونه بهینه با در نظر گرفتن نتایج ریز ساختار و با توجه به بیشترین ریز سختی انتخاب شد. نمونه بهینه دارای سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه و ۴ پاس است. کامپوزیت سطحی تولید شده به منظور بررسی ریز ساختار با میکروسکوپ نوری بررسی شد. همچنین خواص مکانیکی (ریزسختی) کامپوزیت تولید شده مورد بررسی قرار گرفت تا نسبت به فلز پایه مقایسه شود. نتایج تست ریزسختی نشان دهنده آن است که نمونه کامپوزیتی نسبت به فلز پایه بهبود یافته است. ریزسختی فلز پایه و نمونه چهار پاس به ترتیب ۴۴ ویکرز و ۶۱ ویکرز می‌باشد. با توجه به تست‌های انجام شده نمونه‌هایی که با نسبت سرعت دورانی به پیشروی ۲۵ تحت فرآیند قرار گرفته‌اند کیفیت ظاهری قابل قبولی را دارند.

کلید واژگان

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱، پارامترهای موثر، خواص مکانیکی

Investigation of the effective parameters on $Al_{6061} / Al_2O_3.WC.SiC$ composite by friction stir process

Hossein Lashgari¹, Mohammad Hosseinpour Gollo², Amir Momeni³, Soroush Parvizi⁴

1- Master of Science in Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Faculty of Materials Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran

4- Assistant Professor, Faculty of Modern Materials and Technology Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 16785-136 Tehran, Iran, parvizi@sru.ac.ir

Abstract

Friction Stir processing is a new method for modifying the microstructure and mechanical properties of materials and is an effective method for producing surface composites. In this study, this process was used to produce a 6061AA surface composite with Al_2O_3 , WC and SiC reinforcement particles with an average particle size of 10 ± 4 μm . First, a combination of linear and rotational speed was applied to the specimens. Then the optimum sample was selected considering the microstructure results and the maximum microhardness. The optimum sample has a rotational speed of 1000 rpm, the linear speed of 40 mm/min and 4 passes. The surface composite produced was examined for microstructure evaluation by optical microscopy. The mechanical and microstructure properties of the manufactured composite were also compared to the base metal. The results of the microhardness test show that the composite sample has improved compared to the base metal. Base metal and four-pass processed specimens have 44 and 61 Vickers hardness, respectively. According to the tests carried out, the specimens processed at a rotational speed to linear ratio of 25 have acceptable surface quality.



Keywords

Frictional Stir processing, 6061 aluminum alloy, Investigation of effective parameters, Mechanical properties

۱- مقدمه

فرایند اصطکاکی اغتشاشی (FSP) در سال ۲۰۰۳ میلادی توسط میسرا و همکاران [۱] برای اصلاح خصوصیات سطحی و ایجاد کامپوزیت سطحی ابداع شد. در فرآیند FSP همانند FSW از حرکت ابزار غیر مصرفی در حال چرخش برای اصلاح ساختار استفاده می‌شود [۲]. تغییر شکل شدید همراه با افزایش دما در حین FSP منجر به تغییرات ریزساختاری در موضع مورد نظر می‌شود [۳، ۴]. آلیاژهای آلومینیوم به علت خواص خوبی که دارند؛ از جمله استحکام بالا، شکل پذیری خوب و ... در صنایع بزرگ از قبیل صنایع خودروسازی و صنایع هوافضا پرمصرف می‌باشند [۵]. در فرایند اصطکاکی اغتشاشی، سرعت چرخشی و سرعت پیشروی ابزار تأثیر مهمی بر ریزساختار و در نتیجه بر خواص فلز دارند. برای مثال، الانگوان و همکاران [۶] گزارش دادند که افزایش سرعت چرخشی ابزار از مقدار ۱۵۰۰ به ۱۶۰۰ دور بر دقیقه، منجر به افزایش استحکام آلیاژ آلومینیوم ۲۲۱۹ می‌شود. با این وجود، ون و همکاران [۷] گزارش دادند که متناسب با افزایش سرعت چرخشی ابزار، خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ به طور پیوسته کاهش می‌یابد. الانگوان و همکاران [۸] به بررسی تأثیر سرعت‌های چرخشی متفاوت ابزار بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ پرداختند. آن‌ها بیان کردند که یک مقدار سرعت چرخشی بهینه برای دستیابی به بهترین خواص مکانیکی وجود دارد. و استفاده از سرعت‌های بالاتر و کمتر از سرعت بهینه منجر به کاهش خواص مکانیکی می‌شود. در این راستا، موریشیگ و همکاران [۹] گزارش دادند که افزایش سرعت چرخشی ابزار از ۵۰۰ به ۱۵۰۰ دور بر دقیقه منجر به افزایش اندازه دانه آلیاژ آلومینیوم خالص می‌شود. دولتخواه و همکاران [۱۰] بیان کردند که افزایش تعداد پاس نقش مثبتی در بهبود خواص مکانیکی و سایشی کامپوزیت آلومینیوم تقویت شده با ذرات کاربید سیلیسیم تولید شده با فرایند اصطکاکی اغتشاشی دارد. در یک مطالعه دیگر، سینگ و همکاران [۱۱] به بررسی تأثیر تعداد پاس‌ها بر خواص مکانیکی و سایشی آلیاژ Al-Si پرداختند. آن‌ها گزارش دادند که با افزایش تعداد پاس تا عدد ۲، یک روند افزایشی در خواص مکانیکی و سایشی حاصل می‌شود. اما با افزایش بیشتر تعداد پاس خواص به شدت کاهش می‌یابد. که دلیل آن درشت شدن دانه‌ها با افزایش حرارت است. گل محمدی و همکاران [۱۲] گزارش نمودند که با افزایش تعداد پاس موجب کاهش اندازه دانه و در نتیجه منجر به ایجاد ساختار همگن‌تر می‌شود. همچنین بررسی‌های آن‌ها نشان داد که افزایش تعداد پاس منجر به افزایش سختی نمونه کامپوزیتی می‌شود. هدف از این مطالعه بررسی پارامترهای موثر بر روی کامپوزیت Al6061/Al2O3.WC.SiC برای پیدا کردن

پارامترهای بهینه است. بنابراین به منظور درک تأثیر مستقیم این فرایند بر خواص مختلف آلومینیوم، انجام این مطالعه ضروری به نظر می‌رسد.

۲- مواد و روش‌ها

در این مطالعه، از صفحات آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-T6 با ابعاد ۵×۵×۱۰۰ میلی‌متر مکعب به عنوان فلز پایه استفاده شد که در شکل ۲ نشان داده شده است. نمونه‌ها در دمای ۵۲۹ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت برای انحلال رسوبات موجود مورد عملیات انحلالی قرار داده شده است. ترکیب شیمیایی آلیاژ ۶۰۶۱ در جدول ۱ ارایه شده است.

پودرهای کاربید سیلیسیم، کاربید تنگستن و اکسید آلومینیوم با اندازه دانه 10 ± 4 میکرومتر به عنوان ذرات تقویت کننده استفاده شد. جهت جایگذاری پودرها حفره‌هایی در ابعاد ۲×۲ در مرکز نمونه‌ها با فاصله ۲ میلی‌متر ایجاد شد (شکل ۲). از دو ابزار برای انجام فرآیند FSP استفاده شد که ابزار اول فاقد پین بود و برای بستن سطح حفره‌ها استفاده شد تا در هنگام انجام مرحله اصلی پودرها به بیرون حفره‌ها ریخته نشود. ابزار دوم که دارای پین بوده کار اصلی که همان تولید کامپوزیت سطحی است را انجام می‌دهد (شکل ۱). جنس ابزار در این فرآیند بسیار مهم است زیرا انتخاب جنس مناسب برای ابزار موجب کاهش ساییدگی و افزایش عمر ابزار می‌شود. بنابراین ابزار مورد استفاده از جنس فولاد گرمکار (H13) انتخاب شد که میزان سختی آن HRC 52 بود. ابعاد ابزار شامل قطر پین ۶ میلی‌متر، قطر شانه ۲۰ میلی‌متر و ارتفاع پین نیز ۳ میلی‌متر بود و به منظور تسهیل جریان مواد زاویه انحراف ابزار نسبت به سطح نمونه ۳ درجه انتخاب شد. فرآیند FSP با سرعت‌های دورانی ۷۵۰، ۱۰۰۰ و ۱۴۰۰ دور بر دقیقه در سرعت‌های پیشروی ۲۸، ۴۰ و ۵۶ میلی‌متر بر دقیقه و تعداد پاس (۱-۴) انجام شد تا در پارامترهایی که در آن نمونه بی‌عیب تولید می‌شود به دست آید. سپس بر روی نمونه‌ها تست ریزسختی گرفته شد و نمونه‌ای که بیشترین سختی را داشت به عنوان نمونه بهینه انتخاب شد. نمونه با پارامترهای (سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه و ۴ پاس) نسبت به سایر نمونه‌ها از سختی بالاتری برخوردار بود و بنابراین به عنوان نمونه بهینه انتخاب شد.



جدول ۱ ترکیب محلول اچ.

ترکیب	مقدار (ml)	زمان
آب	۸۵	۱۰-۶
اسید هیدروکلوریک	۶	
اسید نیتریک	۶	
اسید هیدروفلوریک	۳	

به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌های فرآوری شده، نمونه‌هایی عمود بر سطح مقطع فرآوری شده طبق استاندارد ASTM E3-01 برای انجام فرآیند متالوگرافی تهیه شد تا با میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گیرند. برای آشکارسازی ساختار نمونه‌ها از محلولی که ترکیب آن در جدول ۲ آورده شده است استفاده شد. سختی سطحی نمونه‌های فرآوری شده در فاصله ۱/۵ میلی‌متر از سطح در نقاط متفاوت از سطح مقطع با استفاده از استاندارد ASTM E384 به روش میکروویکرز توسط دستگاه MAXT-10 با نیروی ۱۰۰ گرم و مدت ۲۵ ثانیه انجام شد.

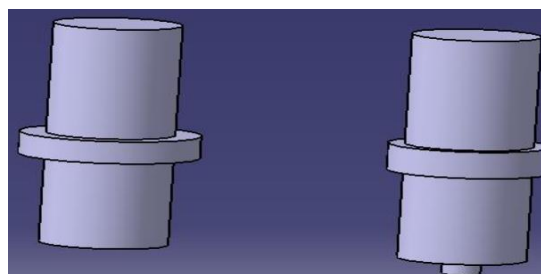
جدول ۲ عناصر تشکیل دهنده فلز پایه.

ترکیب عناصر	Cr	Zn	Mg	Mn	Cu	Fe	Si	Al
درصد عناصر وزنی (گرم)	۰/۱	۰/۰۳	۰/۹۸	۰/۰۵	۰/۱۹	۰/۳۵	۰/۶۰۵	مابقی

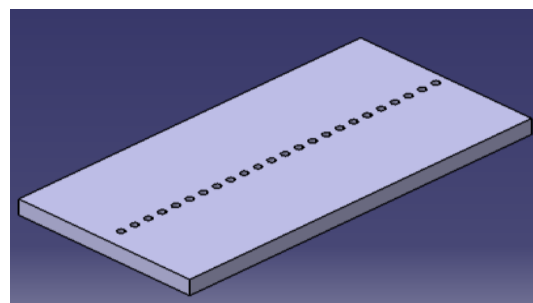
۳- نتایج و بحث

۱-۳- ریزساختار

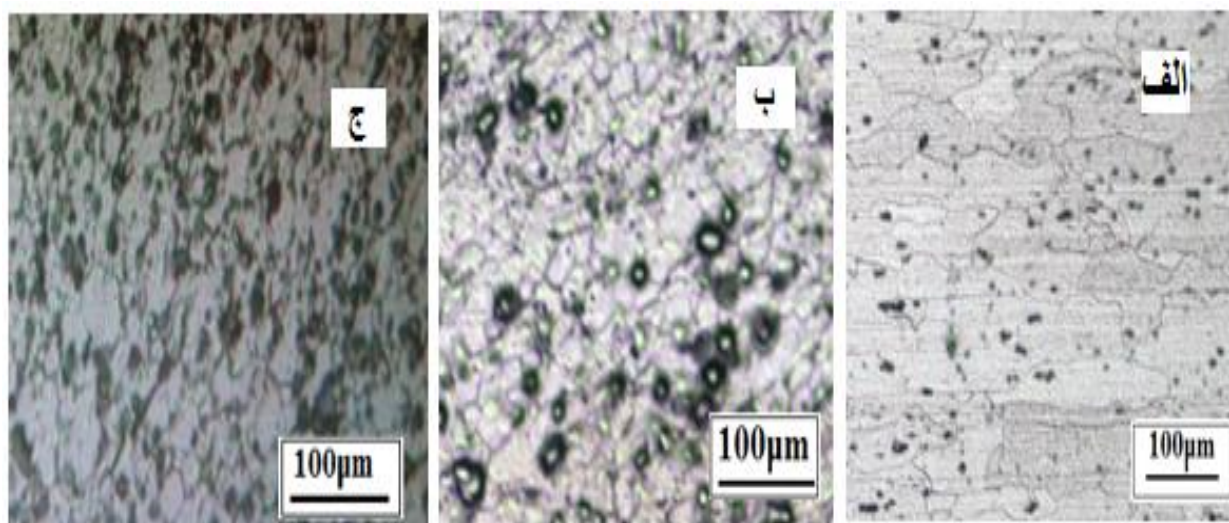
شکل ۳ تصویر حاصل از میکروسکوپ نوری از مقطع عرضی نمونه FSP شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به دلیل بالا بودن انرژی نقص چیده شدن اعتقاد بر این است که تبلور مجدد دینامیکی دلیل اصلی در کاهش اندازه دانه‌ها هست. همان‌طور که دیده می‌شود، در اثر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، اندازه دانه‌ها در ناحیه اغتشاشی به قدری کاهش یافته است که اندازه‌گیری آن‌ها با استفاده از تصاویر متالوگرافی به سختی حاصل می‌شود. در واقع پاس اول فرآیند FSP منجر به اصلاح ریزساختار و باعث تشکیل دانه‌های ریز در ناحیه اغتشاش یافته می‌شود.



شکل ۱ تصویر پین و شولدر



شکل ۲ تصویر شماتیک محل‌های قرارگیری ذرات تقویت کننده در آلیاژ پایه



شکل ۳ تصاویر متالوگرافی؛ الف) فلز پایه، ب) نمونه تک پاس، ج) نمونه ۴ پاس. (سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه)

به عنوان محلی برای جوانه‌زنی همگن در طی تبلور مجدد عمل کرده و باعث کاهش اندازه دانه در ساختار می‌گردد [۱۴].

سه عامل مهم به عنوان مانع در برابر حرکت نابجایی در کامپوزیت‌های زمینه فلزی سطحی وجود دارد: (۱) مرزدانه‌ها (۲) برابر نبودن ضریب انبساط حرارتی بین ذرات تقویت کننده و زمینه فلزی (۳) رفتار تغییر شکل غیر مشابه بین ذرات تقویت کننده و زمینه فلزی [۱۵]. در جدول ۳ میانگین اندازه دانه‌ها در ناحیه اغتشاش ارائه شده است.

۳-۲- ریزسختی

میانگین سختی آلومینیوم ۶۰۶۱ آنیل شده، HV 44 به دست آمد. شکل ۴ و ۵ نمودار سختی نمونه‌های فرآوری شده و جدوا ۴ شماره نمونه‌ها با پارامترهای استفاده شده برای هر نمونه را نشان می‌دهد. در نمونه بدون پودر FSP شده میزان سختی به ۵۰ رسید که نسبت به فلز پایه به میزان HV 6 افزایش یافته است. طبق رابطه هال-پچ اندازه دانه با سختی رابطه عکس دارند بطوری که با کاهش اندازه دانه میزان سختی افزایش می‌یابد و به علت اینکه اندازه دانه‌ها در نمونه بدون پودر کمتر از فلز پایه است سختی افزایش یافته است [۱۶].

در نمونه FSP شده با پودر سه عامل باعث افزایش سختی می‌گردد: (۱) کاهش اندازه دانه (۲) حضور ذرات تقویت کننده در فلز زمینه (۳) اثر کرنش سختی به علت متفاوت بودن ضریب انبساط حرارتی بین ذرات تقویت کننده و فلز زمینه [۲]. شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد پاس

با افزایش تعداد پاس‌ها اندازه دانه‌ها ریزتر می‌شود و توزیع ذرات تقویت کننده یکنواخت‌تر شده و هر گونه آگلومره شدن ذرات را از بین می‌برد تا تعداد بیشتری از فصل مشترک زمینه و ذرات تقویتی ایجاد گردد [۱۳]. وجود ذرات در ساختار مانند یک مانع در برابر رشد دانه‌ها عمل کرده و باعث ریز شدن دانه می‌شود، به این عمل پینینگ گفته می‌شود ولی این امکان وجود دارد که با افزایش دما در طی فرآیند میزان انرژی ذخیره شده در مرزدانه‌ها بالا رفته و باعث رشد دانه‌ها شود. از سوی دیگر ذرات تقویتی

جدول ۳ اندازه دانه فلز پایه و ناحیه SZ کامپوزیت‌ها

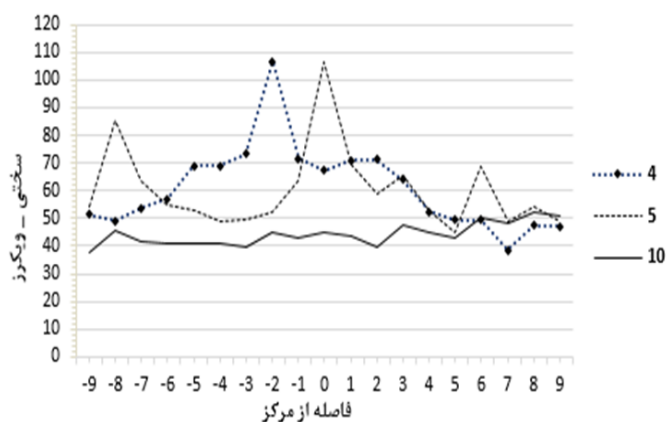
تعداد پاس	اندازه دانه (میکرومتر)
فلز پایه	92 ± 48
۱	12 ± 8
۴	10 ± 6



چرخشی ابزار، مقادیر ریزسختی، استحکام تسلیم کامپوزیت کاهش می‌یابند. انواری و همکاران [۱۹] به منظور ساخت کامپوزیت هیبریدی آلومینیوم ۶۰۶۱ با ذرات تقویتی اکسید کروم، تعداد پاس را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها گزارش دادند که با افزایش تعداد پاس به خاطر افزایش درصد ترکیبات بین فلزی به وجود آمده موجب افزایش سختی شده است. در واقع سختی ایجاد شده ناشی از ریزدانه شدن کمتر از سختی ناشی از عملیات T6 است. پس افزایش تعداد پاس موجب افزایش ریزدانه‌گی همچنین موجب افزایش در یکنواختی توزیع ذرات تقویتی می‌شود که در نهایت ریزسختی و استحکام نمونه‌ها را بیشتر می‌کند. ولی این افزایش ریزسختی و استحکام به اندازه افزایش در عملیات T6 نیست.

جدول ۴ پارامترهای استفاده شده در نمونه‌ها

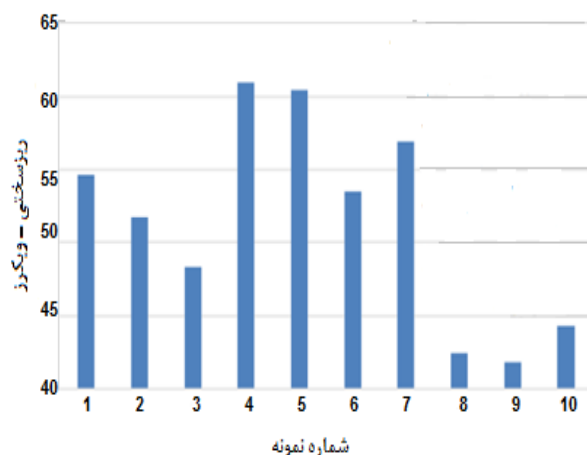
تعداد پاس	سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	شماره نمونه
۴	۵۶	۱۴۰۰	۱
۲	۵۶	۱۴۰۰	۲
۱	۵۶	۱۴۰۰	۳
۴	۴۰	۱۰۰۰	۴
۲	۴۰	۱۰۰۰	۵
۱	۴۰	۱۰۰۰	۶
۴	۲۸	۷۵۰	۷
۲	۲۸	۷۵۰	۸
۱	۲۸	۷۵۰	۹
فلز پایه آنیل شده			۱۰



شکل ۵ نمودار میکروسختی.

میزان سختی افزایش یافته است و ماکزیمم سختی مربوط به نمونه چهار پاس با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه است که میزان سختی به ۶۱ و حدود ۱۷ ویکرز نسبت به فلز پایه افزایش یافته است و علت آن می‌تواند کاهش ۸۲ میکرومتری اندازه دانه نسبت به فلز پایه باشد. برای مثال، الرایز و همکاران [۱۶] به بررسی تاثیر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ پرداختند. آن‌ها گزارش داده‌اند که افزایش تعداد پاس در این فرآیند منجر به افزایش حرارت و در نتیجه درشت شدن ذرات فاز ثانویه می‌شود. نتایج آن‌ها نشان داد که متناسب با افزایش تعداد پاس، خواص مکانیکی نمونه کاهش می‌یابد. در یک مطالعه دیگر دواراجو و همکاران [۱۷] تاثیر سرعت چرخشی ابزار بر خواص مکانیکی و سایشی کامپوزیت آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به همراه ذرات تقویت کننده کاربید سیلیسیم با گرافیت را مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که متناسب با افزایش سرعت

نمونه شماره ۴ و ۵ دارای بیشترین سختی هستند. دلیل سخت‌تر شدن این نمونه‌ها این است که دارای دانه‌های ریزتر و عاری از هر گونه عیب‌های تخلخلی و حفره‌ای هستند. این نمونه‌ها از یک سرعت دورانی و پیشروی برخوردار بوده و فقط تعداد پاس آن‌ها متفاوت است. پس طبق نمودارهای ریزسختی می‌شود نتیجه گرفت که سرعت پیشروی ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه پارامترهای بهینه‌تری نسبت به دیگر سرعت‌ها هستند. آروبی و همکاران [۱۸] گزارش دادند که در آلومینیوم ۶۰۶۱ با افزایش سرعت چرخشی پین از ۹۰۰ دور بر دقیقه به ۱۴۰۰ دور بر دقیقه، سختی کاهش می‌یابد.



شکل ۴ نمودار ستونی میکروسختی.



۴- نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی رفتار مکانیکی آلومینیوم ۶۰۶۱ بررسی شد و پارامترهای بهینه در این فرآیند برای این آلیاژ تعیین شد.

۱- استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی موجب کاهش اندازه دانه به صورت جدی شده به صورتی که اندازه دانه فلز پایه 92 ± 48 میکرومتر به اندازه 10 ± 6 میکرومتر در ناحیه SZ رسید. در ضمن کاهش اندازه دانه موجب افزایش سختی می شود به طوری که سختی فلز پایه آنیل شده از ۴۴ ویکرز در نمونهی فرایند شده به ۶۱ ویکرز رسیده است.

۲- افزایش در تعداد پاس باعث افزایش ریزدانه گشته و این امر موجب افزایش سختی شده است. به طوری که نمونه در یک، دو و چهار پاس دارای سختی، به ترتیب ۶۱، ۶۰، ۵۳ ویکرز می باشند.

۳- سرعت دورانی و سرعت پیشروی وابسته به هم بوده و همیشه یک نسبتی بین این دو می باشد و برای هر آلیاژ این نسبت متفاوت می باشد. برای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ این نسبت ۲۵ می باشد.

۴- پارامترهای بهینه برای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ برابر با؛ سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۴۰ میلی متر بر دقیقه و ۴ پاس می باشد که بهترین خصوصیات مکانیکی در این پارامترها حاصل شد است.

۵- وجود ذرات تقویتی در فرآیند FSP موجب بهتر شدن خصوصیات مکانیکی می شود. به طوری که سختی نمونهی فرایند شده بدون ذره ۵۰ ویکرز شد در حالی که سختی نمونهی فرایند شده با ذرات تقویتی ۶۱ ویکرز می باشد.



۵ - منابع

- processing," *J. Mater.*, vol. 37, pp. 458–464, 2012.
- [11] S. K. Singh, R. J. Immanuel, S. Babu, S. K. Panigrahi, and G. D. J. Ram, "Influence of multi-pass friction stir processing on wear behaviour and machinability of an Al-Si hypoeutectic A356 alloy," *J. Mater. Process. Tech.*, 2016.
- [12] M. Golmohammadi, M. Atapour, and A. Ashrafi, *Fabrication and wear characterization of an A413/Ni Surface Metal Matrix Composite fabricated via Friction Stir Processing*. Elsevier Ltd., 2015.
- [13] R. Bauri, D. Yadav, and G. Suhas, "Effect of friction stir processing (FSP) on microstructure and properties of Al-TiC in situ composite," vol. 528, pp. 4732–4739, 2011.
- [14] F. J. Humphreys, P. B. Prangnell, and R. Priestner, "Fine-grained alloys by thermomechanical processing," vol. 5, pp. 15–21, 2001.
- [15] Z. Y. Ma, "Friction Stir Processing Technology: A Review," *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 39, pp. 642–657, 2008.
- [16] M. M. El-ayes and E. A. El-danaf, "Journal of Materials Processing Technology The influence of multi-pass friction stir processing on the microstructural and mechanical properties of Aluminum Alloy 6082," *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 212, no. 5, pp. 1157–1168, 2012.
- [17] A. Devaraju, A. Kumar, and B. Kotiveerachari, "Influence of rotational speed and reinforcements on wear and mechanical properties of aluminum hybrid composites via friction stir processing," *Mater. Des.*, vol. 45, pp. 576–585, 2013.
- [18] D. Aruri, K. Adepu, K. Adepu, and K. Bazavada, "Wear and mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy surface hybrid composites [(SiC + Gr) and (SiC + Al₂O₃)] fabricated by friction stir processing," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 2, no. 4, pp. 362–369, 2013.
- [19] S. R. Anvari, F. Karimzadeh, and M. H. Enayati, "A novel route for development of Al – Cr – O surface nano-composite by friction stir processing," *J. Alloys Compd.*, vol. 562, pp. 48–55, 2013.
- [1] R. S. Mishra, Z. Y. Ma, and I. Charit, "Friction stir processing: A novel technique for fabrication of surface composite," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 341, no. 1–2, pp. 307–310, 2003.
- [2] R.S. Mishra and Z.Y. Ma, "Friction Stir Welding and Processing II Article in Materials Science and Engineering R Reports · September 2005," *Mater. Sci. Eng. R*, vol. 50, no. September 2005, pp. 1–78, 2005.
- [3] A. Z.- Hanzaki, "Wear assessment of Al / Al₂O₃ nano-composite surface layer produced using friction stir processing," *Wear*, vol. 270, no. 5–6, pp. 403–412, 2011.
- [4] F. Nascimento, T. Santos, P. Vilac, R. M. Miranda, and L. Quintino, "Microstructural modification and ductility enhancement of surfaces modified by FSP in aluminium alloys," vol. 506, pp. 16–22, 2009.
- [5] A. Thangarasu, N. Murugan, and I. Dinaharan, "Microstructure and microhardness of AA1050 / TiC surface," vol. 37, no. October, pp. 579–586, 2012.
- [6] K. Elangovan and V. Balasubramanian, "Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy," *Mater. PROCESSING TECHNOLOGY*, vol. 0, pp. 163–175, 2007.
- [7] Y. J. Kwon, I. Shigematsu, and N. Saito, "Mechanical properties of fine-grained aluminum alloy produced by friction stir process," vol. 49, pp. 785–789, 2003.
- [8] K. Elangovan, V. Balasubramanian, and M. Valliappan, "Effect of Tool Pin Profile and Tool Rotational Speed on Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA6061 Aluminium Alloy Effect of Tool Pin Profile and Tool Rotational Speed on Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA6061 Aluminium Alloy," vol. 6914, pp. 251–260, 2008.
- [9] T. Morishige, T. Hirata, M. Tsujikawa, and K. Higashi, "Comprehensive analysis of minimum grain size in pure aluminum using friction stir processing," *Mater. Lett.*, vol. 64, no. 17, pp. 1905–1908, 2010.
- [10] A. Dolatkhah, P. Golbabeai, M. K. B. Givi, and F. Molaiekiya, "Investigating effects of process parameters on microstructural and mechanical properties of Al5052 / SiC metal matrix composite fabricated via friction stir

