**بررسی پارامترهای موثر بر روی کامپوزیت Al6061/Al2O3.WC.SiC ساخته شده با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی**

**حسین لشگری1، محمد حسین پور گللو2 ، امیر مومنی3 ، سروش پرویزی4**

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

**2- دانشیار، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی، تهران، ایران**

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

**4- استادیار، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مواد و فناوری‌های نوین، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی، تهران، ایران**

\*تهران، صندوق پستی 16785-136 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 6061 با ذرات تقویت کننده کاربید سیلیسیم،کاربید تنگسن و اکسید آلومینیم با اندازه ذرات میانگین 4±10 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 1000 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی 40 میلی‌متر بر دقیقه و 4 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 دهنده‌ی آن است که نمونه‌ی کامپوزیتی نسبت به فلز پایه بهبود یافته است. ریزسختی فلز پایه و نمونه چهار پاس به ترتیب 44 ویکرز و 61 ویکرز می‌باشد. با توجه به تست‌های انجام شده نمونه‌هایی که با نسبت سرعت دورانی به پیشروی 25 تحت فرآیند قرار گرفته‌اند کیفیت ظاهری قابل قبولی را دارند.

**کلید واژگان**

**فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، آلیاژ آلومینیوم 6061، پارامترهای موثر، خواص مکانیکی**

**Investigation of the effective parameters on Al6061 / Al2O3.WC.SiC composite by friction stir process**

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

1. Master of Science in Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
2. Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee 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 Rajaee 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 Al203, 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

**1- مقدمه**

فرایند اصطکاکی اغتشاشی (FSP) در سال 2003 میلادی توسط میشرا و همکاران]1[ 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]2[. تغییر شکل شدید همراه با افزایش دما در حین FSP منجربه تغییرات ریزساختاری در موضع مورد نظر می‌شود]3،4[. آلیاژهای آلومینیوم به علت خواص خوبی که دارند؛ از جمله استحکام بالا، شکل‌پذیری خوب و ... در صنایع بزرگ از قبیل صنایع خودروسازی و صنایع هوافضا پرمصرف می‌باشند]5[. در فرایند اصطکاکی اغتشاشی، سرعت چرخشی و سرعت پیشروی ابزار تاثیر مهمی بر ریزساختار و در نتیجه بر خواص فلز دارند. برای مثال، الانگوان و همکاران]6[ گزارش دادند که افزایش سرعت چرخشی ابزار از مقدار 1500 به 1600 دور بر دقیقه، منجربه افزایش استحکام آلیاژ آلومینیوم 2219 می‌شود. با این وجود، ون و همکاران]7[ گزارش دادند که متناسب با افزایش سرعت چرخشی ابزار، خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 1050 به طور پیوسته کاهش می‌یابد. الانگوان و همکاران]8[ به بررسی تاثیر سرعت‌های چرخشی متفاوت ابزار بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 6061 پرداختند. آن‌ها بیان کردند که یک مقدار سرعت چرخشی بهینه برای دستیابی به بهترین خواص مکانیکی وجود دارد. و استفاده از سرعت‌های بالاتر و کمتراز سرعت‌ بهینه منجربه کاهش خواص مکانیکی می‌شود. در این راستا، موریشیگ و همکاران]9[ گزارش دادند که افزایش سرعت چرخشی ابزار از500 به 1500 دور بر دقیقه منجربه افزایش اندازه دانه آلیاژ آلومینیم خالص می‌شود. دولتخواه و همکاران]10[ 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]11[‌ به بررسی تاثیر تعداد پاس‌ها بر خواص مکانیکی و سایشی آلیاژ Al-Si پرداختند. آن‌ها گزارش دادند که با افزایش تعداد پاس تا عدد 2، 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]12[ گزارش نمودند که با افزایش تعداد پاس موجب کاهش اندازه دانه و در نتیجه منجربه ایجاد ساختار همگن‌تر می‌شود. همچنین بررسی های آن‌ها نشان داد که افزایش تعداد پاس منجربه 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 تاثیر مستقیم این فرایند بر خواص مختلف آلومینیم، انجام این مطالعه ضروری به نظر می‌رسد.

**2- مواد و روش‌ها**

در این مطالعه، از صفحات آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 با ابعاد 5×50×100 میلی‌متر مکعب به عنوان فلز پایه استفاده شد که در شکل 2 نشان داده شده است. نمونه‌ها در دمای 529 درجه سانتی‌گراد به مدت 1 ساعت برای انحلال رسوبات موجود مورد عملیات انحلالی قرار داده شده است. ترکیب شیمیایی آلیاژ 6061 در جدول 1 ارایه شده است.

پودرهای کاربید سیلیسیم، کاربید تنگستن و اکسید آلومینیوم با اندازه دانه 4±10 میکرومتر به عنوان ذرات تقویت کننده استفاده شد. جهت جایگذاری پودرها حفرهایی در ابعاد 2×2 در مرکز نمونه‌ها با فاصله 2 میلی‌متر ایجاد شد (شکل 2). 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 1). 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 6 میلی‌متر، قطر شانه 20 میلی‌متر و ارتفاع پین نیز 3 میلی‌متر بود و به منظور تسهیل جریان مواد زاویه انحراف ابزار نسبت به سطح نمونه 3 درجه انتخاب شد. فرآیند FSP‌ با سرعت‌های دورانی 750 ، 1000 و 1400 دور بر دقیقه در سرعت‌های پیشروی 28 ، 40 و 56 میلی‌متر بر دقیقه و تعداد پاس (1-2-4) 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 1000 دور بر دقیقه٬ سرعت پیشروی 40 میلی متر بر دقیقه و 4 پاس) نسبت به سایر نمونه‌ها از سختی بالاتری برخوردار بود و بنابراین به عنوان نمونه بهینه انتخاب شد.

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 میکرسکوپ نوری مورد بررسی قرار گیرند. برای آشکارسازی ساختار نمونه‌ها از محلولی که ترکیب آن در جدول 2 آورده شده است استفاده شد. سختی سطحی نمونه‌های فرآوری شده در فاصله 5/1 میلی‌متر از سطح در نقاط متفاوت از سطح مقطع با استفاده از استاندارد ASTM E384 به روش میکرو ویکرز توسط دستگاه MAXT-10 با نیروی 100 گرم و مدت 25 ثانیه انجام شد.

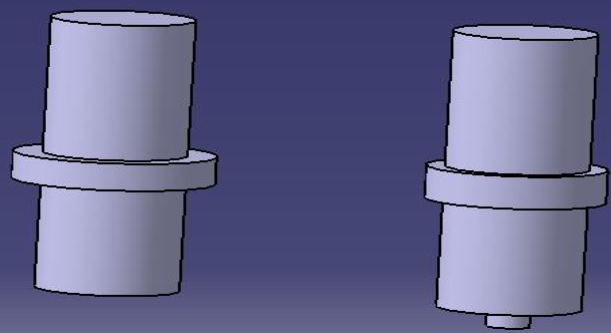
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **ترکیب** | **مقدار (ml)** | **زمان** |
| **آب** | **85** | **6-10** |
| **اسید هیدروکلوریک** | **6** |
| **اسید نیتریک** | **6** |
| **اسید هیدروفلوریک** | **3** |

**جدول 1** ترکیب محلول اچ.

**جدول 2** عناصر تشکیل دهنده فلز پایه.

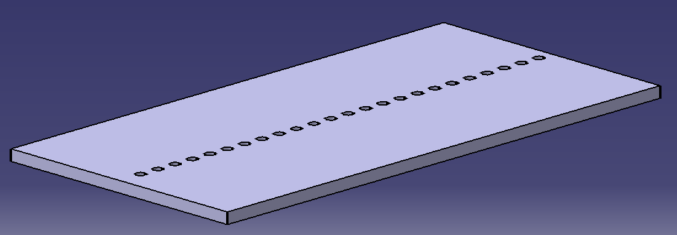
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **ترکیب عناصر** | **Cr** | **Zn** | **Mg** | **Mn** | **Cu** | **Fe** | **Si** | **Al** |
| **درصد عناصر وزنی (گرم)** | **1/0** | **03/0** | **98/0** | **05/0** | **19/0** | **35/0** | **605/0** | **مابقی** |

**3- نتایج و بحث**

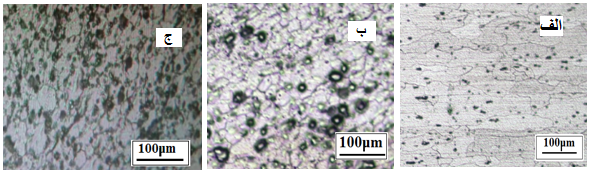
**3- 1 - ریزساختار**

**شکل 1** تصویر پین و شولدر

شکل 3 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، انداز دانه‌ها در ناحیه اغتشاشی به قدری کاهش یافته است که اندازگیری آن‌ها با استفاده از تصاویر متالوگرافی به سختی حاصل می‌شود. در واقع پاس اول فرآیند FSP منجربه اصلاح ریزساختار و باعث تشکیل دانه‌های ریز در ناحیه اغتشاش یافته می‌شود.



**شکل 2** تصویر شماتیک محل‌های قرارگیری ذرات تقویت کننده در آلیاژ پایه



**شکل 3** تصاویر متالوگرافی ؛ الف) فلز پایه٬ ب) نمونه تک پاس، ج) نمونه 4 پاس. (سرعت دورانی 1000 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 40 میلی‌متر بر دقیقه)

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]13[. 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

به عنوان محلی برای جوانه‌زنی همگن در طی تبلور مجدد عمل کرده و باعث کاهش اندازه دانه در ساختار می‌گردد]14[.

سه عامل مهم به عنوان مانع در برابر حرکت نابجایی در کامپوزیت‌های زمینه فلزی سطحی وجود دارد: (1) مرزدانه‌ها (2) برابر نبودن ضریب انبساط حرارتی بین ذرات تقویت کننده و زمینه فلزی (3) رفتار تغییر شکل غیر مشابه بین ذرات تقویت کننده و زمینه فلزی]15[. در جدول 3 میانگین اندازه دانه‌ها در ناحیه اغتشاش ارائه شده است.

**جدول 3** اندازه دانه فلز پایه و ناحیه SZ کامپوزیت‌ها

|  |  |
| --- | --- |
| **تعداد پاس** | **اندازه دانه (میکرومتر)** |
| **فلز پایه** | **48±92** |
| **1** | **8±12** |
| **4** | **6±10** |

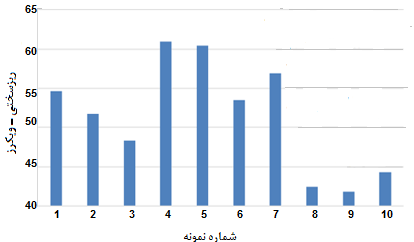
**3-2 - ریزسختی**

میانگین سختی آلومینیوم 6061 آنیل شده، HV 44 به دست آمد. شکل 4 و 5 نمودار سختی نمونه‌های فرآوری شده و جدوا 4 شماره نمونه‌ها با پارامترهای استفاده شده برای هر نمونه را نشان می‌دهد. در نمونه بدون پودر FSP شده میزان سختی به 50 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]16[.

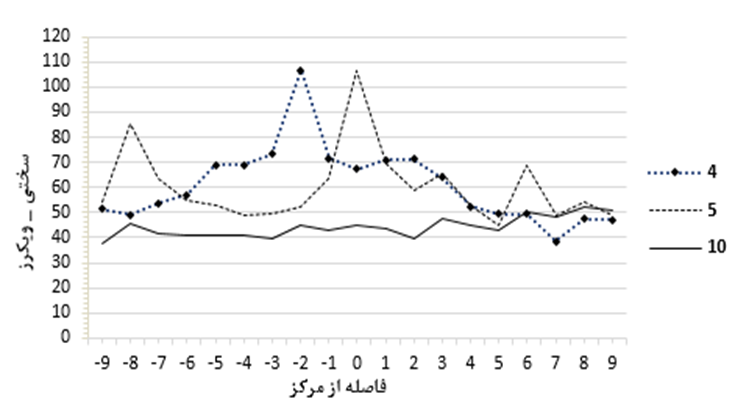
در نمونه FSP شده با پودر سه عامل باعث افزایش سختی می‌گردد: (1) کاهش اندازه دانه (2) حضور ذرات تقویت کننده در فلز زمینه (3) اثر کرنش سختی به علت متفاوت بودن ضریب انبساط حرارتی بین ذرات تقویت کننده و فلز زمینه ]2[. شکل 4 نشان می‌دهد که با افزایش تعداد پاس میزان سختی افزایش یافته است و ماکزیمم سختی مربوط به نمونه چهار پاس با سرعت دورانی 1000 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 40 میلی‌متر بر دقیقه است که میزان سختی به 61 و حدود 17 ویکرز نسبت به فلز پایه افزایش یافته است و علت آن می‌تواند کاهش 82 میکرومتری اندازه دانه نسبت به فلز پایه باشد. برای مثال، الرایز و همکاران]16[ به بررسی تاثیر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ آلومینیوم 6082 پرداختند. آن ها گزارش داده‌اند که افزایش تعداد پاس در این فرآیند منجربه 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]17[ تاثیر سرعت چرخشی ابزار بر خواص مکانیکی و سایشی کامپوزیت آلیاژ آلومینیوم 6061 به همراه ذرات تقویت کننده کاربید سیلیسیم با گرافیت را مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که متناسب با افزایش سرعت چرخشی ابزار، مقادیر ریزسختی، استحکام تسلیم کامپوزیت کاهش می‌یابند. انواری و همکاران]19[ به منظور ساخت کامپوزیت هیبریدی آلومینیوم 6061 با ذرات تقویتی اکسید کروم، تعداد پاس را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها گزارش دادند که با افزایش تعداد پاس به خاطر افرایش 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 ریزدانگی 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 4** پارامترهای استفاده شده در نمونه‌ها

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **تعداد پاس** | **سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)** | **سرعت دورانی ( دور بر دقیقه)** | **شماره نمونه** |
| **4** | **56** | **1400** | **1** |
| **2** | **56** | **1400** | **2** |
| **1** | **56** | **1400** | **3** |
| **4** | **40** | **1000** | **4** |
| **2** | **40** | **1000** | **5** |
| **1** | **40** | **1000** | **6** |
| **4** | **28** | **750** | **7** |
| **2** | **28** | **750** | **8** |
| **1** | **28** | **750** | **9** |
| **فلز پایه آنیل شده** | | | **10** |

****نمونه شماره 4 و 5 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 40 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی 1000 دور بر دقیقه پارامترهای بهینه‌تری نسبت به دیگر سرعت‌ها هستند. آرویی و همکاران ]18[ گزارش دادند که در آلومینیوم6061 با افزایش سرعت چرخشی پین از 900 دور بر دقیقه به 1400 دور بر دقیقه، سختی کاهش می‌یابد.

**شکل 4** نمودار ستونی میکروسختی.



**شکل 5** نمودار میکروسختی.

**4- نتیجه‌گیری**

در این پژوهش تاثیر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی رفتار مکانیکی آلومینیوم 6061 بررسی شد و پارامترهای بهینه در این فرآیند برای این آلیاژ تعیین شد.

1- استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی موجب کاهش اندازه دانه به صورت جدی شده به صورتی که اندازه دانه فلز پایه 48±92 میکرومتر به اندازه 6±10 میکرومتر در ناحیه SZ رسید. در ضمن کاهش اندازه دانه موجب افزایش سختی می‌شود به‌طوری که سختی فلز پایه آنیل شده از 44ویکرز در نمونه‌ی فرایند شده به 61 ویکرز رسیده است.

2- افزایش در تعداد پاس باعث افزایش ریزدانگی گشته و این امر موجب افزایش سختی شده است. به‌طوری که نمونه در یک، دو و چهار پاس دارای سختی، به ترتیب 53 ،60 ،61 ویکرز می‌باشند.

3- سرعت دورانی و سرعت پیشروی وابسته به‌هم بوده و همیشه یک نسبتی بین این دو می‌باشد و برای هر آلیاژ این نسبت متفاوت می‌باشد. برای آلیاژ آلومینیوم 6061 این نسبت 25 می‌باشد.

4- پارامترهای بهینه برای آلیاژ آلومینیوم 6061 برابر با؛ سرعت دورانی 1000 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی 40 میلی‌متر بر دقیقه و 4 پاس می‌باشد که بهترین خصوصیات مکانیکی در این پارامترها حاصل شد است.

5- وجود ذرات تقویتی در فرآیند FSPموجب بهتر شدن خصوصیات مکانیکی می‌شود. به‌طوری که سختی نمونه‌ی فرایند شده بدون ذره 50 ویکرز شد درحالی که سختی نمونه‌ی فرایند شده با ذرات تقویتی 61 ویکرز می‌باشد.

**5 - منابع**

[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 / Al 2 O 3 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. PROCSSING TECNNOLOGY*, 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. Golbabaei, 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 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-rayes 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 + Al<inf>2</inf>O<inf>3</inf>)] 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.