



بررسی تجربی رفتار خستگی پر چرخه مواد مرکب Al6061/SiC تهیه شده به روش اصطکاکی اغتشاشی

حسین ترابیان^{۱*}، سیمین کمالی روستا^۲، محمد جلوخانی نیارکی^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران، ایران

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام (ره)، تهران، ایران

۳- دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران، ایران

* نویسنده مخاطب: h_torabian@iauctb.ac.ir

در این پژوهش با استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی برای تولید کامپوزیت‌های سطحی با سرعت پیشروی و دورانی ثابت، نمونه در تعداد پاس‌های مختلف (یک، سه و پنج) ساخته و برای بدست آوردن محدوده تنش و انجام تنظیمات دستگاه و اعمال بارگذاری آزمون خستگی، تست کشش انجام می‌شود. نتایج بررسی ریزساختار نشان داد با افزایش تعداد پاس، توزیع ذرات زمینه بهتر شده و بیشترین استحکام تسلیم نمونه‌های کامپوزیتی، برای نمونه یک پاس می‌باشد نتایج حاصل تست خستگی نمونه‌ها مشخص شد نمونه سه پاس - دوم بیشترین عمر خستگی پرچرخه را بین کامپوزیت‌های ساخته شده دارد. هدف اینست با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی عیوب ریختگری را حذف و ریزساختار فلزی بهبود یابد نتیجتاً سختی و استحکام فلز بهبود یافته و مقاومت به سایش، خستگی و خوردگی افزایش یابد و شکل پذیری بهبود یابد در نتیجه افزایش تعداد پاس منجر به توزیع همگن و یکنواخت ذرات تقویت کننده شده است. افزایش تعداد پاس سبب توزیع و جدایش بهتر ذرات کاربیدسیلیسیم در فاز زمینه شده است.

واژه‌های کلیدی: فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، تعداد پاس، رفتار کششی، رفتار خستگی پرچرخه

Experimental Investigation on High Cycle Fatigue Behavior of Al6061/SiC Composite Fabricated by Friction Stir Processing

H. Torabian^{1*} ID, S. Kamaliroosta², M. JelokhaniNiaraki³ ID

1. Assistant Professor, Mechanical Engineering Dpt. Islamic Azad University Central Tehran Branches, Tehran, Iran

2. M. Sc, Department of Mechanical Engineering, Yadegar-e-Imam Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3. PhD, Mechanical Engineering Dpt. Islamic Azad University Central Tehran Branches, Tehran, Iran

*Corresponding Author: h_torabian@iauctb.ac.ir

According to friction stir processing for production of surface composites with constant progress and rotational speed, samples are made in different number of passes (1,3,5) and to obtain the stress range and adjust the device and apply the fatigue and tensile test is performed. Results of micro-structure study showed that with increasing number of passes, the distribution of underlying particles is improved, and maximum yield strength is for one sample and three samples have the longest High cycle life fatigue. The goal is improve the metal micro-structure with the new friction stirring technique, result shown the strength of the metal is improved, and resistance to wear, fatigue and corrosion is increased, it causes improvement of form-ability, which results increase in the number of The pass has led to a homogeneous and uniform distribution of reinforcing particles, in fact, increasing the number of passes in the process has led to a better distribution and separation of silicon-carbide particles in ground phase..

Keywords: Friction Stir Processing, Pass Numbers, Tensile Behavior, Fatigue Behavior High Cycle



COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

How to Cite this in Article:

H. Torabian, S. Kamaliroosta, M. JelokhaniNiaraki, " Experimental Investigation on High Cycle Fatigue Behavior of Al6061/SiC Composite Fabricated by Friction Stir Processing," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 1-10, 2024 (in Persian).

۱ مقدمه

تکنیک جدید اصطکاکی اغتشاشی عیوب ریختگری را حذف کرده و ریزساختار فلزی را بهبود می‌بخشد در نتیجه سختی و استحکام فلز بهبود یافته و مقاومت به سایش، خستگی و خوردگی نیز افزایش می‌یابد و سبب بهبود شکل پذیری می‌شود. فرآیند اصطکاکی اغتشاشی یک فرآیند حالت جامد است که بر پایه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و با هدف همگن‌سازی ساختار فلز و اصلاح ریزساختار برای تولید کامپوزیت سطحی و اصلاح خواص سطح استفاده می‌شود.

آلیاژهای آلومینیوم یکی از پرکاربردترین مواد مهندسی به خصوص در صنایع هوا و فضا و خودروسازی هستند، به گونه‌ای که پس از فولاد پراهمیت‌ترین فلز صنعتی محسوب می‌شوند. ویژگی‌های مناسب این آلیاژ، نه تنها در خواص ویژه آن، بلکه در قابلیت بالای آن در تولید انواع کامپوزیت‌ها و روش‌های اصلاح-سازي ساختار آن می‌باشد. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که آلیاژهای آلومینیوم در بین مواد پیشرفته و جدید که استفاده از آن‌ها رو به افزایش است، سهم بالایی را به خود اختصاص دهد. در این میان گروه ۶۰۰۰ به‌ویژه آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با توجه به قابلیت انجام عملیات حرارتی، خواص مناسبی از جمله نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت خوردگی زیاد، قابلیت شکل‌پذیری و جوشکاری خوب را دارا می‌باشد که منجر به کاربردهای فراوان آن در صنایع شده است. علی‌رغم خصوصیات خوب آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ افزایش خواصی مانند استحکام، انعطاف‌پذیری و خستگی، منجر به افزایش کاربردهای ویژه‌ای برای این آلیاژ می‌شود [۱]

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی یک فناوری مهندسی سطح است که می‌تواند با حذف موضعی عیوب ریختگری و اصلاح ریز ساختار، به بهبود استحکام و انعطاف پذیری، افزایش مقاوت به خوردگی و خستگی، افزودن کارپذیری و بهبود سایر خواص منجر شود. این فرآیند یک روش بر پایه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۱ است که در سال ۱۹۹۱ توسط مؤسسه جوش انگلستان^۲ ابداع شد و در سال‌های اخیر پیشرفت چشمگیری در این زمینه صورت گرفته است. اگرچه فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به عنوان روش اصلاح دانه بندی پیشرفت نموده است اما یک فرآیند جذاب برای ساخت کامپوزیت‌ها می‌باشد. در سال‌های اخیر از این روش برای ترکیب کردن ذرات سرمایی با سطح آلیاژهای فلزات مختلف از جمله آلومینیوم و منیزیم به منظور تولید کامپوزیت سطحی استفاده شده است [۲]. فرآیند اصطکاکی اغتشاشی شیوه‌ای است که بر اصول جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بنا نهاده شده است با این تفاوت که در این فرآیند، جوشکاری در میان نیست و ابزار غیر مصرفی به

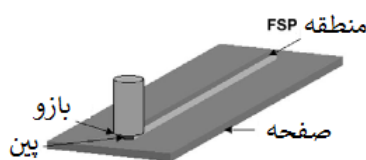
درون قطعه رفته و دو ماده، شامل ماده پایه و ماده تقویت کننده را با هم مخلوط کرده و با تولید کامپوزیت پایه فلزی، خواص بهینه‌ای نسبت به فلز پایه به دست می‌آید. در این روش نیاز به یک ابزار سیلندری شکل است که شامل شانه و پین می‌باشد. با چرخش ابزار و تماس پین با سطح ماده، ناحیه انتخاب شده در اثر اصطکاک، گرم و دچار تغییر شکل پلاستیکی و اکستروژن شده و با ترکیب حرکت پیشروی ابزار، مواد به طور متلاطم از جلوی پین به پشت آن جریان می‌یابند. نقش اصلی شانه ابزار تمرکز حرارت اصطکاکی به وسیله جلوگیری از فرار و دور شدن ماده پلاستیک شده از ناحیه متلاطم می‌باشد و طی این فرآیند، پودری که در طول خط حرکت پین ریخته شده است، با ماده پلاستیک شده مخلوط و در صورت بهینه کردن متغیرها، به صورت کاملاً همگن درون ماده مخلوط شده و کامپوزیت ذکر شده را به وجود می‌آورد.

پین ابزار دو کار اصلی زیر را انجام می‌دهد:

گرم کردن قطعه به وسیله اصطکاک

حرکت دادن مواد به منظور اتصال

گرما در اثر اصطکاک بین پین و قطعه کار و تغییر شکل پلاستیک قطعه تولید می‌شود. حرارت متمرکز شده باعث نرم شدن مواد اطراف پین و با تلفیق حرکت دورانی پین، باعث حرکت مواد از جلوی پین به عقب می‌گردد و در اثر این فرآیند اتصال در حالت جامد رخ می‌دهد. بدیهی است که به علت ساختار هندسی پین، موادی که در اطراف پین حرکت می‌کنند، به خوبی با یکدیگر ترکیب می‌شوند. شکل ۱ نمای کلی این فرآیند را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمایی از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی [۲]

وانگ و همکاران [۳]، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات کاربید سیلیسیم را توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی تولید نموده و نشان داد که با افزایش تعداد پاس ذرات تقویت کننده به خوبی در زمینه آلومینیوم توزیع می‌شوند.

نصرالله کیاجمالی و همکاران [۴]، لایه کامپوزیت سطحی را با استفاده از توزیع ذرات کاربید سیلیسیم (چهار پاس) با آلیاژ سری دوم آلومینیوم که شامل آلومینیوم، سیلیسیم و مس را به روش فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

1. Friction Stir Processing
2. Friction stir welding
3. The welding institute (TWI)

در واقع این زاویه باعث اکستروژن خوب ماده از جلوی پین به پشت آن در حین فرآیند تولید شده و باعث توزیع بهتر ذرات تقویت کننده در قطعه شده و از تولید حفره جلوگیری می کند. شکل ۲ تصاویری از ابزارهای مورد استفاده در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی را نشان می دهد.

در این پژوهش، تنها پارامتر متغیر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی تعداد پاس ها (یک، سه و پنج پاس) می باشد. پس از انجام هر پاس، میز کار حرکت می کند تا به نقطه ابتدای فرآیند برسد. در شکل ۳ ایجاد لایه سطحی کامپوزیتی به روش فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نشان داده شده است.

برای بررسی ریزساختار نمونه ها از میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی های ۱۰،۲۵،۵۰،۱۰۰،۲۵۰ برابر استفاده شده است. جهت به دست آوردن محدوده اعمال تنش مناسب برای انجام آزمون خستگی، آزمون کشش بر روی نمونه ها انجام شد. با توجه به ضخامت ورق (۵ میلی متر) و محدودیت ابعادی ورق پایه برای انجام عملیات جوشکاری، ابعاد نمونه های تست کشش بر اساس استاندارد ASTM-E 8M و بصورت ابعاد Subsize مطابق با شکل ۴ تهیه گردید.



شکل ۲- تصاویر ابزارهای مورد استفاده در این پژوهش



شکل ۳- ایجاد لایه سطحی کامپوزیتی به روش فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

کامپوزیت کردند و به این نتیجه رسیدند که پراکندگی ذرات با افزایش تعداد پاس ها بهبود پیدا می کند

۲ مواد و روش تحقیق

فلز زمینه از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به صورت ورق مستطیلی به ابعاد 100×50×5 mm در نظر گرفته شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ ۶۰۶۱ با آنالیز کوانتومتری براساس استاندارد 2016: ASTM E1251-11 اندازه گیری و در جدول ۱ ارائه شده است.

به منظور لایه کامپوزیتی می بایست پودر کاربید سیلیسیم به ناحیه عملیات اضافه می شد. در مرحله اول، توسط یک ماشین فرز، با استفاده از تیغه فرز شیاری به عمق ۱ میلی متر و عرض ۲ میلی متر در سرتاسر طول قطعه آلومینیومی ایجاد شد. پس از آن، قطعه شیار خورده را درون محلول استون قرار داده تا تمامی چربی ها و ناخالصی های موجود در سطح و درون شیار زدوده شود.

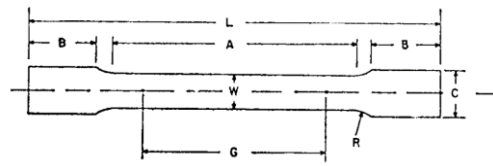
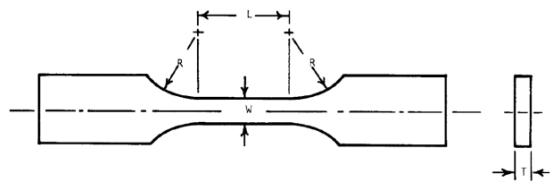
در مرحله دوم، قطعه آلومینیومی شیار زده شده بر روی یک نگهدارنده (فیکسچرینگ) که وظیفه ثابت نگهداشتن نمونه را به عهده داشت قرار گرفته و سپس ابزار بدون پین بر روی دستگاه اصطکاکی اغتشاشی بسته شد و با سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۸۰ میلی متر بر دقیقه، عمود بر سطح شیار حرکت کرده و در نهایت سطح شیار پر شده از ذرات تقویت کننده مسدود گردید. این عمل به این دلیل است که اگر شیار باز باشد و فرآیند اصلی برای تولید کامپوزیت اجرا شود، باعث خارج شدن ذرات تقویت کننده از درون شیار شده و عملاً کامپوزیتی تشکیل نخواهد شد.

در مرحله سوم، بعد از مسدود شدن سطح شیار و حصول اطمینان از خارج نشدن پودرها، جهت توزیع ذرات تقویت کننده در سطح قطعه، ابزار اصلی درون سه نظام دستگاه بسته می شود و بعد کله گی ماشین در جهت عمود بر سطح قطعه $\alpha=3$ درجه تغییر داده خواهد شد. این زاویه، زاویه انحراف (زاویه محور) نام دارد و در تمام طول فرآیند تولید ثابت است.

جدول ۱ - ترکیبات وزنی عناصر تشکیل دهنده ورق خام ۶۰۶۱ (درصد وزنی)

نام عنصر	درصد وزنی
Mg	۰/۸۹
Mn	۰/۰۴۶۷
Fe	۰/۳۴۲
Si	۰/۶۸۹
Cu	۰/۱۷۵
Zn	۰/۰۲۴
Ni	۰/۰۰۳۹
Cr	۰/۲۱۶

خستگی کشش- فشار موجود در دانشگاه صنعتی شریف
تحت آزمایش خستگی پر چرخه قرار گرفتند.



شکل ۴- شماتیکی از نمونه تست کشش [۵]

شکل ۶- ابعاد و هندسه نمونه های تست خستگی پر چرخه [۶]



شکل ۷- نمونه تست خستگی پر چرخه

در این پژوهش نمونه های آلیاژ آلومینیوم 6061 و
نمونه های کامپوزیتی (یک، سه و پنج پاس) توسط دستگاه
تست خستگی کشش- فشار موجود در دانشگاه صنعتی
شریف تحت آزمایش خستگی پر چرخه قرار گرفتند.

۳ نتایج و بررسی

۱.۳ ریزساختار

به منظور بررسی تأثیر تعداد پاس فرآیند اصطکاکی
اغتشاشی بر میکروساختار نهایی کامپوزیت ساخته شده،
ریزساختار ناحیه اغتشاشی نمونه های کامپوزیتی به وسیله
میکروسکوپ نوری لمورد مطالعه قرار گرفت.

شکل های ۸، ۹ و ۱۰ به ترتیب ریزساختار حاصل از
تأثیر تک پاس، سه پاس و پنج پاس فرآیند اصطکاکی
اغتشاشی را روی همگن شدن توزیع پودر را نشان می دهند.
در شکل ۱۱ نیز ریز ساختار آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نشان داده
شده است. همانطور که مشخص است با افزایش تعداد پاس
مساحت منطقه همگن افزایش پیدا می کند اما همچنان
نواحی غیرهمگن به چشم می خورد. بنابراین بهترین توزیع
پودر کاربرد سیلیسیم مربوط به نمونه کامپوزیتی پنج پاس
می باشد. این نمونه همگن ترین ساختار و بهترین توزیع پودر
را دارد. افزایش تعداد پاس منجر به توزیع همگن و یکنواخت
ذرات تقویت کننده می شود.

برای تهیه نمونه های آزمون کشش، مطابق با استاندارد
ASTM-E8M نمونه های کامپوزیتی (یک، سه و پنج پاس) و
بدون کامپوزیت از هرکدام ۱ عدد در ابعاد مشخص شده
برای آزمون کشش که از ناحیه کامپوزیتی و نمونه اولیه
(آلیاژ آلومینیوم 6061) استخراج شده است. شکل ۵ نمونه ای
از تست کشش را نشان می دهد.

در این پژوهش از آزمایش های خستگی پر چرخه
استفاده می کنیم. ابعاد نمونه های تست خستگی پر چرخه بر
اساس استاندارد ASTM- E466-96 تهیه شده است. شماتیکی
از نمونه تست خستگی پر چرخه استفاده شده در شکل ۶ را
مشاهده می نمایید.

جهت تهیه نمونه های آزمون خستگی، مطابق با
استاندارد ASTM-E466 96 برای تست خستگی پر چرخه،
۸ نمونه کامپوزیتی (یک، سه و پنج پاس) و بدون کامپوزیت
در ابعاد مشخص شده طبق استانداردهای سیکل پر چرخه
تهیه شده است. این نمونه ها به وسیله یک دستگاه خستگی
کششی- فشاری تحت آزمایش خستگی پر چرخه قرار گرفتند.
شکل ۷ نمونه ای از تست خستگی پر چرخه را نشان می دهد.
همانطور که قبلاً ذکر شد، روش ارائه داده های
مهندسی در رفتار خستگی پر چرخه استفاده از نمودار N-S
است که در آن تنش نسبت به عمر خستگی برحسب تعداد
سیکل های تا شکست ارائه می شود. در این نمودار، همواره
برای N یک مقیاس لگاریتمی مورد استفاده قرار
می گیرد. مقدار تنش S نیز می تواند دامنه تنش یا تنش
ماکزیمم باشد.



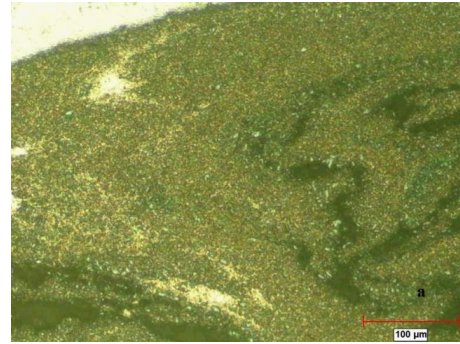
شکل ۵- نمونه تست کشش

در این پژوهش نمونه های آلیاژ آلومینیوم 6061 و
کامپوزیتی (یک، سه و پنج پاس) توسط دستگاه تست

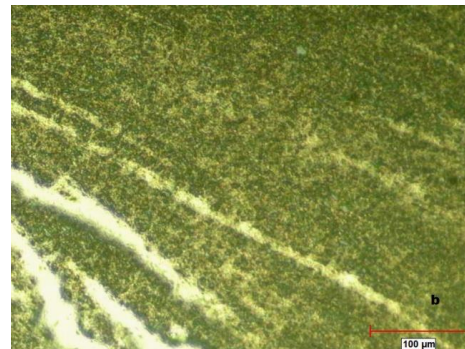
شکل ۸ ریزساختار نمونه ناحیه اغتشاشی یک پاس را نشان می‌دهد، با بررسی ریز ساختار نمونه یک پاس مشاهده گردید در ناحیه اغتشاشی حفره وجود دارد، جوش به خوبی پر نشده است، فاصله ذرات از یکدیگر بسیار کم می‌باشد در واقع متراکم هستند، تجمع ذرات وجود دارد. اندازه متوسط ذرات کاربید سیلیسیم حدود ۴ تا ۱۰ میکرون می‌باشد. در این نمونه همانطور که توضیح داده شد توزیع پودر مناسبی انجام نشده است اما به دلیل حرارت ورودی مطلوب ایجاد شده اندازه ذرات نسبت به نمونه پنج پاس و سه پاس کاهش یافته است. در واقع در این نمونه میانگین اندازه ذرات به دلیل تبلور مجدد دینامیکی و کاهش دما، کاهش می‌یابد.

شکل ۹ ریز ساختار ناحیه اغتشاشی سه پاس را نشان می‌دهد، با بررسی ریزساختار نمونه سه پاس مشاهده گردید در ناحیه اغتشاشی حفره و تخلخل وجود ندارد اما جوش، جوش کامل نیست یعنی ذرات کامل هم زده نشده‌اند، فاصله ذرات نسبت به نمونه یک پاس بیشتر است و مانند نمونه یک پاس تجمع ذرات مشاهده نمی‌شود. اندازه متوسط ذرات کاربید سیلیسیم حدود ۸ تا ۱۴ میکرون می‌باشد. در این نمونه علی‌رغم اینکه توزیع ذرات نسبت به نمونه یک پاس بهتر است، اما اندازه ذرات نسبت به پاس قبلی افزایش یافته است که به دلیل افزایش حرارت ورودی است. به علت تغییر شکل شدید پلاستیک و افزایش ناگهانی دما در منطقه هم زده، دانه‌ها شکسته می‌شوند و مرزدانه‌هایی با زاویه کم ایجاد می‌شود [۷]. این نقاط، نقاط مناسبی برای جوانه زنی هستند. در این نقاط تبلور مجدد رخ می‌دهد که موجب ایجاد یک ساختار ریزدانه در منطقه هم زده می‌شود [۸]. در بازبایی مکانیکی مرزدانه‌ها با زاویه کم به مرزدانه‌های با زاویه زیاد تبدیل می‌شوند و همین تبدیل موجب بزرگ شدن دانه‌ها می‌شود [۹]. حرکت مرزدانه یک پدیده نفوذی است و با افزایش دما حرکت آن تسریع می‌شود و می‌تواند منجر به درشت شدن دانه‌های تبلور مجدد یافته شود. در منطقه تحت تأثیر حرارت بخشی از رسوب‌ها با ابعاد درشت در مرزدانه‌ها رسوب نموده و با ایجاد تردی در مرزدانه‌ها سبب کاهش مقاومت به شکست می‌شوند.

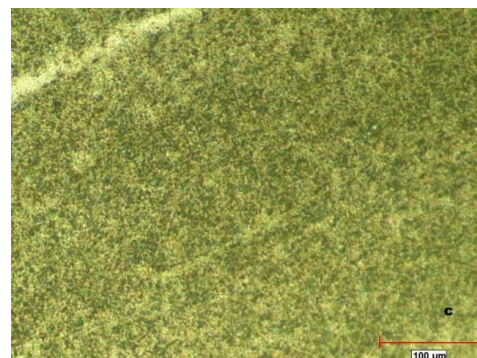
شکل ۱۰، ریزساختار ناحیه اغتشاشی پنج پاس را نشان می‌دهد، با بررسی ریزساختار نمونه پنج پاس مشاهده گردید، حفره وجود ندارد، ذرات به خوبی هم زده شده‌اند، توزیع ذرات نسبت به نمونه‌های یک پاس و سه پاس به خوبی انجام شده است و فاصله ذرات زیاد می‌باشد. در نمونه پنج پاس مشاهده گردید، اندازه متوسط ذرات کاربید سیلیسیم از زیر یک میکرون، تا ۱۲ میکرون وجود دارد. در این نمونه ریز دانه شدن ذرات کاربید سیلیسیم (زیر یک میکرون) به توزیع پودر مناسب مربوط می‌شود. زیرا ذرات تقویت کننده می‌توانند مانند مانعی در برابر حرکت مرزدانه‌ها عمل کنند و با



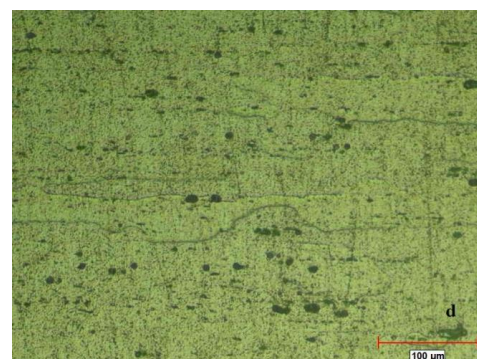
شکل ۸ - ریز ساختار کامپوزیت تحت یک پاس



شکل ۹- ریز ساختار کامپوزیت تحت سه پاس



شکل ۱۰- ریز ساختار کامپوزیت تحت پنج پاس



شکل ۱۱- آلیاژ آلومینیوم 6061

اتفاق خواهد افتاد. طبق رابطه و نمودار حال-پیچ، با کاهش اندازه ذرات، استحکام ماده افزایش می‌یابد. بنابراین انتظار می‌رود که تنش تسلیم نمونه کامپوزیتی یک پاس، نسبت به نمونه سه و پنج پاس بیشتر باشد.

تغییر سرعت چرخش و سرعت انتقالی بر روی خواص مکانیکی تأثیر می‌گذارد. عباسی و همکارانش [۱۲]، مشاهده کردند که با افزایش نسبت سرعت چرخش به سرعت پیشروی کاهش ناچیزی در خواص کششی در مناطق مختلف ناحیه اغتشاشی و ناحیه عملیات گرما مکانیکی به وجود می‌آید که به علت افزایش حرارت ورودی و نرم شدن ماده در این مناطق است زمانی که نسبت سرعت چرخش به سرعت پیشروی زیاده‌تر شود عیب نفوذ ناقص ریشه باعث کاهش خواص خواهد شد.

همچنین میسر و همکارانش [۱۳]، مشاهده کردند که حداکثر حرارت در سطح پین و شولدر، در بیرون فصل مشترک کاهش می‌یابد.

دمای فرآیند، نرخ خنک‌سازی و مدت زمانی که ناحیه عملیات در دمای بالاتر از دمای تبلور مجدد قرار می‌گیرد، تأثیر زیادی بر ریزساختار و اندازه ذرات نهایی و در نتیجه خواص مکانیکی دارد. سرعت دورانی بالا و سرعت پیشروی پایین سبب ایجاد حرارت ورودی بیشتر و در نتیجه ایجاد ساختار درشت دانه تر می‌شود. دو منبع اصلی برای ایجاد حرارت در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی وجود دارد. اول اصطکاک بین شانه و سطح قطعه و دوم تغییر فرم پلاستیکی شدید ماده در حین فرآیند، دما در زیر ابزار در اثر این دو عامل افزایش یافته و حرارت لازم برای نرم شدن و جریان مواد تأمین می‌شود.

بر طبق تحقیقات انجام شده هر عاملی که سبب تغییر در حرارت حاصله بشود، بر ساختار و خواص مکانیکی ماده کامپوزیتی مؤثر است [۱۴].

رابطه کلی بین تنش تسلیم (که معیاری برای سنجش استحکام مواد است) و اندازه ذرات توسط دانشمندی به نام هال-پیچ توسعه گردید که به رابطه هال-پیچ مشهور است که رابطه (۱) استحکام تسلیم با اندازه میانگین ذرات را نشان می‌دهد.

$$\sigma_o = \sigma_i + kD^{-0.5} \quad (1)$$



شکل ۱۲ - نمونه آزمون کشش پس از شکست

محدود کردن حرکت آن‌ها، از درشت شدن ذرات جلوگیری کنند [۱۰]. در واقع افزایش تعداد پاس در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی منجر به توزیع و جدایش بهتر ذرات کاربید سیلیسیم در فاز زمینه می‌شود. از طرف دیگر افزایش تعداد پاس منجر به افزایش پینینگ ذرات کاربید سیلیسیم و تبلور مجدد گشته و از لغزش مرزخانه‌ها جلوگیری می‌کند. در این نمونه میانگین اندازه ذرات به ۱۲ میکرون هم می‌رسد که نسبت به نمونه یک پاس افزایش اندازه ذرات را شاهد هستیم علت آن غلبه عامل گرما بر اثر پینینگ ذرات تقویت کننده است که از کوچکتر شدن بیشتر اندازه دانه جلوگیری کرده است. همانطور که توضیح داده شد، اندازه متوسط ذرات نمونه سه پاس ۸ تا ۱۴ میکرون است و نمونه پنج پاس از زیر یک میکرون تا ۱۲ میکرون هم می‌رسد. دلیل اینکه اندازه ذرات نمونه پنج پاس نسبت به سه پاس کاهش یافته این است که، در نمونه پنج پاس وجود ذرات تقویت کننده به عنوان مانعی در برابر رشد دانه‌ها عمل می‌کنند و دقیقاً به مانند نابجایی‌ها از رشد بیشتر آن‌ها جلوگیری می‌کنند.

این پدیده همانطور که توضیح داده شد، تحت عنوان پینینگ شناخته می‌شود [۱۱]، که موجب ریزدانه تر شدن می‌شود و عامل اصلی کاهش اندازه در نمونه‌های کامپوزیتی شده است. با افزایش تعداد پاس انتظار می‌رفت که منجر به تغییرات و کاهش در اندازه ذرات گردد اما گرمای ورودی موجب افزایش سایز ذرات نسبت به نمونه یک پاس می‌شود.

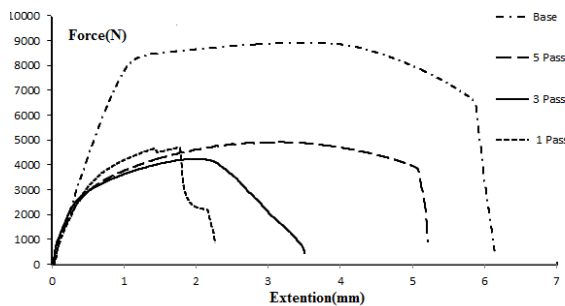
شکل ۱۱، تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه خام را نشان می‌دهد. نمونه اولیه خام نورد شده می‌باشد. دانه‌ها در جهت نورد کشیده شده‌اند. ساختار میکروسکوپی نمونه خام آلومینیوم 6061 نشان دهنده حضور رسوباتی با جنس، شکل، توزیع و اندازه‌های مختلف می‌باشد. به عبارت دیگر در ساختار میکروسکوپی این نمونه‌ها انواع گوناگونی از رسوبات وجود دارد. همانطور که از این شکل آشکار است رسوباتی با شکل و اندازه‌ها و همچنین توزیع متفاوت در نمونه خام وجود دارند.

۲.۳ رفتار کششی

شکل ۱۲ نمونه ای از تست کشش بعد از شکست را نشان می‌دهد. در نمونه یک پاس همانطور که در قسمت قبلی ذکر شد، با توجه به اینکه در این نمونه تجمع ذرات وجود دارد و توزیع ذرات به خوبی انجام نشده است، اما به دلیل اینکه میزان حرارت ورودی مطلوبی داشته است، بنابراین اندازه ذرات کاهش یافته است. به این ترتیب هر قدر که نمونه کامپوزیتی دارای ساختار ریزدانه تر باشد، جوانه زنی ترک دیرتر انجام خواهد شد و رشد ترک با سرعت کمتری

شدن ذرات ریزساختار کامپوزیتی پنج پاس شده نسبت به نمونه یک پاس شده است [۱۶].

استحکام کششی و استحکام تسلیم نمونه‌های کامپوزیتی نسبت به فلز پایه کاهش یافته است که می‌تواند در نتیجه تأثیرات حرارت ایجاد شده طی فرآیند بر ریزساختار این نمونه‌ها باشد و در تقابل مکانیزم‌های استحکام بخش مثل ریزدانه شدن، عوامل ایجاد افت استحکام مانند درشت شدن رسوبات ناشی از حرارت می‌باشد. در جدول ۲ نتایج آزمایش کشش نشان داده شده است.



شکل ۱۴ - منحنی تنش- کرنش مربوط به نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم 6061، کامپوزیت‌های یک پاس، سه پاس و پنج پاس

جدول ۲ - نتایج آزمون کشش

نمونه	استحکام نهایی (MPa)	تسلیم (MPa)
آلومینیوم	8914	8424
کامپوزیت یک پاس	4690	4641
کامپوزیت سه پاس	4236	3856
کامپوزیت پنج پاس	4917	4255

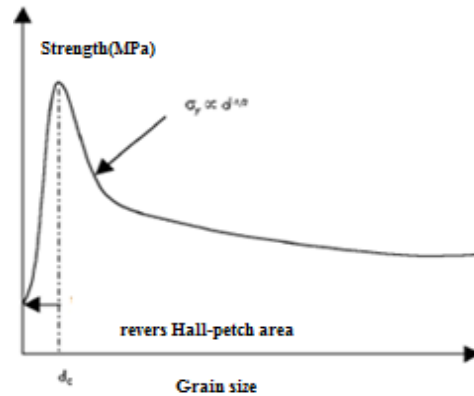
۳.۳ رفتار خستگی پر چرخه

در تنش‌های خستگی بالا انعطاف پذیری بیشتر زمینه تقویت نشده به بیشتر شدن عمر خستگی آن نسبت به کامپوزیت کمک می‌کند [۱۷]

در خستگی پر چرخه، دامنه تنشی اعمالی به قطعه زیر تنش تسلیم، کششی یا فشاری قطعه است و معمولاً عمر نمونه بین ۱,۰۰۰ تا ۱,۰۰۰,۰۰۰ سیکل می‌باشد در این نوع از خستگی تغییر شکل‌های میکرو پلاستیکی در نواحی ناهمگن ماده منجر به جوانه زنی و اشاعه ترک می‌گردد و کرنش‌های اعمالی در محدوده الاستیک است. در خستگی سیکل بالا سهم بالایی از عمر خستگی مربوط به جوانه زنی و اشاعه ترک می‌گردد و این مرحله به شدت متأثر از وجود و نحوه توزیع نواقص در ماده است به همین دلیل داده‌ها و نتایج حاصل از آزمون خستگی پر چرخه دارای پراکندگی بالایی است و محققین با خستگی عموماً به عنوان یک پدیده آماری

در این رابطه σ_0 تنش تسلیم و σ_i تنش اصطکاکی که معرف مقاومت کلی شبکه بلوری در برابر حرکت نقص‌های بلوری است مسئول تغییر شکل مواد است. در رابطه (۱) K ثابت بوده و D نشان دهنده اندازه ذرات است.

این رابطه به روشنی نشان می‌دهد که با کاهش اندازه ذرات، استحکام و تنش تسلیم مواد افزایش می‌یابد.



شکل ۱۳ - منحنی تغییرات استحکام مواد با تغییر اندازه [۱۵]

به صورت کلی با کاهش اندازه ذرات و براساس رابطه هال - پیچ، استحکام مواد افزایش می‌یابد. البته افزایش استحکام با کاهش اندازه ذرات تا یک اندازه بحرانی (تقریباً در حدود ۱۰ نانومتر) ادامه پیدا می‌کند و پس از آن با کاهش اندازه ذرات، استحکام ماده کاهش پیدا می‌کند. در واقع هنگامی که اندازه ذرات از حدی بحرانی کمتر گردید، استحکام به صورت ناگهانی کاهش می‌یابد. به این ناحیه منطقه هال - پیچ معکوس نیز می‌گویند. به طور کلی مطابق با قانون هال - پیچ، استحکام تسلیم با اندازه ذرات رابطه معکوس دارد [۱۵].

توزیع ذرات کاربرد سیلیسیم در نمونه سه پاس نسبت به نمونه یک پاس بهتر است، اما با توجه به میزان حرارت ورودی، در ناحیه اغتشاشی نمونه سه پاس ذرات کاربرد سیلیسیم درشت تری نسبت به نمونه یک پاس مشاهده شده است و طبق رابطه هال - پیچ، باعث کاهش استحکام در این نمونه کامپوزیتی سه پاس می‌شود. بنابراین تنش تسلیم نمونه کامپوزیتی سه پاس نسبت به یک پاس کمتر شد. در شکل ۱۴ منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها نشان داده شده است.

در نمونه پنج پاس، توزیع ذرات کاربرد سیلیسیم در ناحیه اغتشاشی نسبت به نمونه یک و سه پاس بهتر می‌باشد. در واقع قدرت اغتشاش پین و میزان گرمای ورودی به صورت همزمان افزایش می‌یابند. افزایش قدرت اغتشاش پین منجر به توزیع ذرات تقویت‌کننده در فاز زمینه می‌شود که با توجه به قفل‌کنندگی ذرات تقویت‌کننده فاز زمینه، افزایش محل‌های مستعد برای جوانه زنی دانه‌های تبلور مجدد و همچنین تأثیر در شکسته شدن ذرات اولیه، به ریزدانه شدن ساختار کمک می‌کند (اندازه ذرات زیر یک میکرون). از طرفی افزایش میزان حرارت ورودی نیز باعث درشت

نظر می‌رسد که این رنگ تیره از آثار پودر کاربید سیلیسیم باشد که به خوبی ذوب نشده است. از طرفی شکست دقیقاً در ناحیه اغتشاشی صورت گرفته است.

نمونه کامپوزیتی سه پاس - اول: تحت بارگذاری 125MPa پرچرخه قرار گرفته است. این نمونه تعداد خیلی بیشتری تا شکست نهایی طی کرده است. پس از انجام تست، طبق مشاهدات ناحیه شکست، به دلیل اینکه شکست در پایان ناحیه اغتشاشی صورت گرفته است نشان دهنده این است، که فرآیند اصطکاکی اغتشاشی تا حدودی در این نمونه بدون نقص انجام شده است.

نمونه کامپوزیتی پنج پاس - اول: تحت بارگذاری 125MPa پرچرخه قرار گرفته است. نمونه ذکر شده تعداد سیکل زیادی را تا شکست نهایی طی کرده است اما تعداد سیکل این نمونه به مراتب کمتر از نمونه کامپوزیتی سه پاس - اول شد. در این نمونه، شکست در انتهای ناحیه کامپوزیتی صورت گرفته است. اما دلیل اینکه نسبت به نمونه سه پاس - اول تعداد سیکل کمتری را طی کرده است، با مشاهده و مقایسه سطح شکست دو نمونه ذکر شده این نتیجه حاصل شد، که در نمونه سه پاس - اول، شکست در انتهای بیشتری از ناحیه اغتشاشی نسبت به نمونه پنج پاس - اول انجام شده است و این بیانگر این است که ناحیه اغتشاشی نمونه سه پاس - اول کامل تر از پنج پاس - اول صورت گرفته است.

نمونه یک پاس - دوم: تحت بارگذاری 125MPa پرچرخه قرار گرفته است. در طی انجام آزمایش این نمونه بعد از طی تعداد سیکلی کوتاه شکست. با کاهش مقدار ماکزیمم تنش در بارگذاری سیکلی (پرچرخه) برای این نمونه انتظار می‌رفت که تعداد سیکل بیشتری را تا شکست نهایی داشته باشد. ولی در این آزمایش مانند یک پاس - اول چنین اتفاق افتاد. با مشاهده سطح شکست، این نتیجه گیری به دست آمد که شکست در این نمونه کامپوزیتی دقیقاً در وسط ناحیه اغتشاشی صورت گرفته است و علت اینکه در تعداد سیکل پایین می‌شکند می‌تواند به این دلیل باشد که توزیع ذرات تقویت کننده به درستی انجام نشده است و نکته ای دیگر آنکه تغییر رنگ تیره در سطح شکست وجود دارد می‌تواند نشان دهنده این باشد ذرات کاربید سیلیسیم در انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به خوبی ذوب نشده است.

نمونه سه پاس - دوم: تحت بارگذاری 125MPa پرچرخه قرار گرفته است. نمونه کامپوزیتی بعد از طی سیکل زیادی می‌شکند. در واقع این نمونه بیشتر از تمام نمونه‌های کامپوزیتی تعداد سیکل طولانی را تا شکست نهایی طی می‌کند. پس از انجام تست خستگی، با مشاهده سطح شکست این نمونه به وضوح مشخص است که شکست در انتهای ناحیه اغتشاشی به مراتب بیشتر از نمونه‌های قبلی انجام شده است و این بیانگر این است فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در این نمونه بدون نقص انجام شده

برخورد می‌کنند. شرایط سطحی و نحوه نمونه سازی یکی از عوامل خطا در این آزمون است که البته با در نظر گرفتن شرایط یکسان برای نمونه‌های مختلف می‌توان این خطا را کاهش داد [۱۷]. با استفاده از دستگاه تست خستگی، تست‌های خستگی پرچرخه با نسبت تنش $0.1 \times (\text{Applied stress/Tensile Strength})$ بر روی تعداد ۸ نمونه (۵ نمونه کامپوزیتی و ۳ نمونه اولیه) انجام شد. شکل ۱۵ نمونه‌ای از تست خستگی پرچرخه بعد از شکست را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- نمونه آزمون خستگی کم‌چرخه پس از شکست

در جدول ۳ نتایج آزمایش خستگی نشان داده شده است. نمونه اولیه - اول: تحت بارگذاری 260MPa پرچرخه قرار گرفته است. این نمونه بعد از طی سیکلی طولانی می‌شکند. پس از انجام تست خستگی، با مشاهده سطح شکست آن این نتیجه حاصل شد. کمترین مقدار ماکزیمم تنش در بارگذاری مربوط به این نمونه شد و نمونه ذکر شده نسبت به نمونه‌های اولیه همانطور که انتظار می‌رفت دارای تعداد سیکل بیشتری است.

نمونه اولیه - دوم: تحت بارگذاری 270MPa پرچرخه قرار گرفته است. مقدار بارگذاری این نمونه نسبت به نمونه قبلی افزایش یافته است و تعداد سیکل کمتری نسبت به آن تا شکست نهایی داشته است. در این آزمایش مقدار ماکزیمم تنش در بارگذاری سیکلی نسبت به نمونه قبلی افزایش یافته است بنابراین با افزایش مقدار بارگذاری تعداد سیکل شکست نسبت به نمونه قبلی بایستی کاهش پیدا کند.

نمونه اولیه - سوم: تحت بارگذاری 265MPa پرچرخه قرار گرفته است. مقدار ماکزیمم تنش در بارگذاری در این آزمایش بیشتر از نمونه اول و کمتر از دوم و سوم است و تعداد سیکل طی شده تا شکست نهایی آن کمتر از نمونه اول و بیشتر از نمونه دوم و سوم است.

نمونه کامپوزیتی یک پاس - اول: تحت بارگذاری 125MPa پرچرخه قرار گرفته است. با کاهش مقدار ماکزیمم تنش در بارگذاری سیکلی (پرچرخه) برای این نمونه انتظار می‌رفت که تعداد سیکل بیشتری را تا شکست نهایی داشته باشد ولی در تست چنین اتفاق نیافتد و تقریباً ۵۰٪ نسبت به تست اول نمونه دچار شکست شده است. پس از انجام تست با مشاهدات سطح شکست نمونه دوم به وضوح مشخص است که تغییر رنگ تیره در سطح شکست وجود دارد که این مشاهده نسبت به دیگر سطوح شکست قطعات نامنتقی بوده و نشان دهنده وجود عیوب در فرآیند تولید این قطعه است. به

با اینکه توزیع ذرات بصورت مناسبی انجام شده است اما عامل گرما از کوچک شدن بیشتر اندازه ذرات جلوگیری کرد.

با بررسی‌های میکروسکوپ نوری تأیید شد، که با افزایش تعداد پاس توزیع پودر به درستی انجام شده است همچنین میزان تخلخل در ناحیه اغتشاشی کاهش پیدا کرده و مساحت منطقه همگن افزایش می‌یابد.

باتوجه به قانون هال-پچ، استحکام تسلیم با اندازه ذرات رابطه معکوس دارد در نمونه کامپوزیتی که اندازه ذرات آن از همه ریزتر است، استحکام تسلیم آن بیشتر است. بنابر این قانون، استحکام تسلیم نمونه کامپوزیتی یک پاس به دلیل ریزتر بودن ذرات تقویت کننده اش بیشتر است و پس آن باتوجه به اندازه ذرات نمونه پنج پاس و سپس نمونه سه پاس بیشتر است. استحکام تسلیم ورق خام (آلیاژ آلومینیوم 6061) نسبت به نمونه‌های کامپوزیتی به دلیل ریزساختار مربوط به ناحیه اغتشاشی بیشتر شد.

بیشترین عمر خستگی پر چرخه، مربوط به نمونه کامپوزیتی سه پاس-دوم، تحت بارگذاری ماکزیمم 125MPa است و کمترین عمر خستگی مربوط به نمونه کامپوزیتی یک پاس-اول، تحت بارگذاری ماکزیمم 125MPa است.

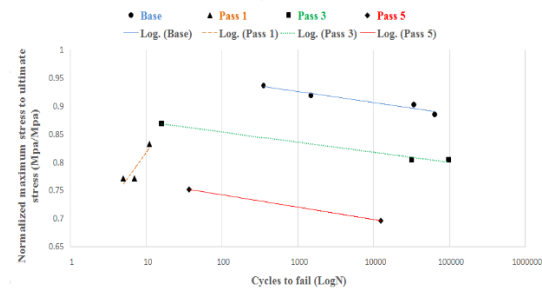
در فرآیند خستگی در سطوح تنشی پایین (خستگی پر چرخه)، نمونه‌های یک پاس-اول و یک پاس-دوم، در تعداد سیکل پایینی، دقیقاً در ناحیه اغتشاشی و در فصل مشترک ذرات تقویت کننده شکستند و با مشاهدات رنگ تیره در ناحیه شکست این دو نمونه مشخص شد کاربرد سیلیسیم که پودر تقویت کننده نمونه‌های کامپوزیتی می‌باشند به درستی ذوب نشده است و نتیجتاً نمونه‌های ذکر شده به درستی هم زده نشده است.

در خستگی پر چرخه نمونه‌های کامپوزیتی، بیشترین عمر خستگی مربوط به سه پاس-دوم شد. این افزایش عمر به این دلیل است، این ناحیه اغتشاشی در مقایسه با نمونه‌های دیگر بدون نقص انجام شده است.

۵ مراجع

- [1] W. Smith, "Structure and Properties Engineering Alloys," McGraw, University of Central Florida, pp. 1-3, 2002. <https://doi.org/10.30699/jtae.2023.7.1.4>
- [2] H. Nami, "Production of Al/TiO2 composite layer by Friction Stir Processing," pp. 50-68, 2011 (in Persian).
- [3] Q.-y. S. W. Wang, P. Liu, H-ke. Li, "A novel way to produce bulk sic reinforced aluminium metal matrix composites by friction stir processing technology " *journal of materials processing* vol. 4, no. 209, pp. 2099-2103, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.05.001>
- [4] M. E. N. Kiajamali, A. K. Sajjadi, "Effect of surface composite layers producing via friction stir

است. در شکل ۱۶ نمودار تغییرات تنش بیشینه اعمالی بر حسب تعداد سیکل شکست خستگی برای تمام نمونه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱۶ - نمودار تغییرات تنش بیشینه اعمالی بر حسب تعداد سیکل شکست خستگی پر چرخه (نمودار دو وهلر) برای نمونه‌های Al, Al1, AIP3, AIP5

جدول ۳ - نتایج آزمون‌های خستگی پر چرخه انجام شده بر حسب تعداد سیکل تا شکست نهایی قطعه (نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم 6061 و کامپوزیت)

نمونه	ماکزیمم بارگذاری (MPa)	سیکل شکست	درصد مقاومت
آلومینیوم	۲۶۰	۶۳۱۲۶	
آلومینیوم	۲۷۰	۱۴۸۹	۹۷/۳۱
آلومینیوم	۲۶۵	۳۳۸۶۵	۲۱/۷۴
یک پاس-اول	۱۲۵	۵	
سه پاس-اول	۱۲۵	۳۱۵۵۴	۶۰/۶۳
پنج پاس-اول	۱۲۵	۱۲۴۲۰	
یک پاس-اول	۱۲۵	۷	
سه پاس-اول	۱۲۵	۹۶۵۳۷	۸۷/۱۳

۴ نتیجه گیری

در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با افزایش تعداد پاس توزیع مناسبی از ذرات تقویت کننده در زمینه به دست می‌آید. در این پژوهش به دلیل قدرت اغتشاش بین، منجر به توزیع بهتر ذرات تقویت کننده در فاز زمینه شد. البته شایان ذکر است، نمونه کامپوزیتی سه پاس جهت تست خستگی پر چرخه، توزیع ذرات بهتری نسبت به نمونه پنج پاس دارد.

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی باعث ریزدانه شدن ساختار می‌شود که ناشی از فرآیندهای بازیابی و تبلور مجدد است. توزیع پودر مناسب و حرارت ورودی مطلوب ایجاد شده باعث ریزدانه شدن نمونه‌های کامپوزیتی با افزایش تعداد پاس می‌شود. در این پژوهش همانطور که گفته شد، توزیع مناسبی از ذرات تقویت کننده با افزایش تعداد پاس صورت گرفت ولی به دلیل افزایش حرارت ورودی، سایز ذرات در نمونه کامپوزیتی سه و پنج پاس درشت تر از یک پاس شد.

- the microstructural and mechanical properties of Aluminum Alloy 6082," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 5, pp. 1157-1168, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.12.017>
- [12] M. A. Gharacheh, A. Kokabi, G. Daneshi, B. Shalchi, and R. Sarrafi, "The influence of the ratio of "rotational speed/traverse speed" (ω/v) on mechanical properties of AZ31 friction stir welds," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 15, pp. 1983-1987, 2006.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.01.007>
- [13] R. S. Mishra and Z. Ma, "Friction stir welding and processing," *Materials science and engineering: R: reports*, vol. 50, no. 1-2, pp. 1-78, 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>
- [14] C. Chang, X. Du, and J. Huang, "Achieving ultrafine grain size in Mg–Al–Zn alloy by friction stir processing," *Scripta Materialia*, vol. 57, no. 3, pp. 209-212, 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.04.007>
- [15] N. Chawla and K. Chawla, "Metal-matrix composites in ground transportation," *JoM*, vol. 58, pp. 67-70, 2006.
<https://doi.org/10.1007/s11837-006-0231-5>
- [16] M. Azizieh, A. H. Kokabi, and P. Abachi, "Effect of rotational speed and probe profile on microstructure and hardness of AZ31/Al2O3 nanocomposites fabricated by friction stir processing," *Materials & Design*, vol. 32, no. 4, pp. 2034-2041, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.11.055>
- [17] K. K. Chawla and N. Chawla, "Automotive composites," *Wiley Encyclopedia of Composites*, pp. 1-6, 2011.
- processing on mechanical properties," presented at the Tehran University of Technology, The first international conference and the 6th joint conference of the Iranian metallurgical Engineering Association, Tehran, 2011 (in Persian).
- [5] J. R. Ellis, *Hand book Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, Contact ASTM International for the latest information*. United States, METRIC, 2001, pp. 1-3.
- [6] D. T. R. a. Morrow, *Hand book Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing 1*. United States, 1998.
- [7] R. a. M. Z. Y. Ma "Mahoney superplastic deformation behavior of Friction Stir Processing Al7075 alloy," *Acta Materialia*, vol. 50, no. 17, pp. 4419-4430, 2002.
[https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00278-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00278-1)
- [8] P. B. P. F. J. Humphreys, R. Priesthner, "Fine – grained alloys by thermomechanical processing, current opinion in solid state and Materials Science," vol. 5, no. 1, pp. 15-21, 2001.
[https://doi.org/10.1016/S1359-0286\(00\)00020-6](https://doi.org/10.1016/S1359-0286(00)00020-6)
- [9] D. Yadav and R. Bauri, "Nickel particle embedded aluminium matrix composite with high ductility," *Materials Letters*, vol. 64, no. 6, pp. 664-667, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2009.12.030>
- [10] P. Asadi, G. Faraji, and M. K. Besharati, "Producing of AZ91/SiC composite by friction stir processing (FSP)," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 51, pp. 247-260, 2010.
<https://doi.org/10.1007/s00170-010-2600-z>
- [11] M. M. El-Rayes and E. A. El-Danaf, "The influence of multi-pass friction stir processing on