



# بررسی تجربی رفتار خستگی کم چرخه ماده مرکب Al6061/SiC تهیه شده به روش اصطکاکی اغتشاشی

محمد جلوخانی نیارکی<sup>۱</sup>، حسین ترابیان<sup>۲\*</sup>، سیمین کمالی‌روستا<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران، ایران

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

\* نویسنده مخاطب: [h\\_torabian@iauctb.ac.ir](mailto:h_torabian@iauctb.ac.ir)

با استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی برای تولید کامپوزیت‌های سطحی با سرعت پیشروی و دورانی ثابت، نمونه‌ها 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 و نمونه پنج پاس، بیشترین عمر خستگی کم‌چرخه را در بین کامپوزیت‌های ساخته شده دارد. هدف این است با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی عیوب ریختگری را حذف و ریزساختار فلزی را بهبود دهیم در نتیجه 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 در واقع افزایش تعداد پاس در این فرآیند سبب توزیع و جدایش بهتر ذرات کاربیدسیلیسیم در فاز زمینه شده است.

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

## Experimental Investigation on low cycle Fatigue Behavior of Al6061/SiC composite Fabricated by Friction Stir Processing

M. Jelokhani Niaraki<sup>1</sup>, H. Torabian<sup>2\*</sup>, S. Kamaliroosta<sup>3</sup>

1 M. Sc. Student, Faculty of Mechanical Engineering, University of Islamic Azad University Central Tehran Branches, Tehran, Iran

2\* Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Islamic Azad University Central Tehran Branches, Tehran, Iran

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

\*Corresponding Author: [h\\_torabian@iauctb.ac.ir](mailto: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 five samples have the longest low 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 low cycle.

## ۱ مقدمه

تکنیک جدید اصطکاک‌آگی 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 اصطکاک‌آگی اغتشاشی یک فرآیند حالت جامد است که برپایه جوشکاری اصطکاک‌آگی 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 اصلاح‌سازی 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 اصطکاک‌آگی اغتشاشی یک فناوری مهندسی سطح است که می‌تواند با حذف موضعی عیوب ریختگری و اصلاح ریزساختار، به بهبود استحکام و انعطاف‌پذیری، افزایش مقاومت به خوردگی و خستگی، افزودن کارپذیری و بهبود سایر خواص منجر شود. این فرآیند یک روش بر پایه جوشکاری اصطکاک‌آگی اغتشاشی است که در سال ۱۹۹۱ توسط مؤسسه جوش انگلستان ابداع شد و در سال‌های اخیر پیشرفت چشمگیری در این زمینه صورت گرفته است. اگرچه فرآیند اصطکاک‌آگی اغتشاشی به عنوان روش اصلاح دانه‌بندی پیشرفت نموده است، اما یک فرآیند جذاب برای ساخت کامپوزیت‌ها می‌باشد. در سال‌های اخیر از این روش برای ترکیب کردن ذرات سرامیکی با سطح آلیاژهای فلزات مختلف از جمله آلومینیوم و منیزیم به منظور تولید کامپوزیت سطحی استفاده شده است [۲].

فرآیند اصطکاک‌آگی اغتشاشی شیوه‌ای است که بر اصول جوشکاری اصطکاک‌آگی اغتشاشی بنا نهاده شده است با این تفاوت که در این فرآیند جوشکاری در میان نیست و ابزار غیرمصرفی به درون قطعه رفته و دو ماده، شامل ماده پایه و ماده تقویت‌کننده را با هم مخلوط

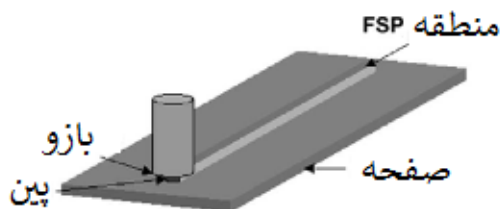
کرده و با تولید کامپوزیت پایه‌فلزی، خواص بهینه‌ای نسبت به فلز پایه به دست می‌آید. در این روش نیاز به یک ابزار سیلندری شکل است که شامل شانه و پین می‌باشد. با چرخش ابزار و تماس پین با سطح ماده، ناحیه انتخاب شده در اثر اصطکاک، گرم و دچار تغییر شکل پلاستیکی و برون‌ریزی<sup>۱</sup> و با ترکیب حرکت پیشروی ابزار، مواد به‌طور متلاطم از جلوی پین به پشت آن جریان می‌یابند. نقش اصلی شانه ابزار تمرکز حرارت اصطکاک‌آگی به‌وسیله 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- نمای از فرآیند اصطکاک‌آگی اغتشاشی [2]

وانگ و همکاران [3]، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی با ذرات کاربید سیلیسیم را توسط فرآیند اصطکاک‌آگی اغتشاشی تولید نموده و نشان داد که با افزایش تعداد پاس، ذرات تقویت‌کننده به خوبی در زمینه آلومینیوم توزیع می‌شوند.

نصرالله کیاجمالی و همکاران [4]، لایه کامپوزیت سطحی را با استفاده از توزیع ذرات کاربید سیلیسیم (چهار پاس) با آلیاژ سری دوم آلومینیوم که شامل آلومینیوم، سیلیسیم و مس می‌باشد را به روش فرآیند اصطکاک‌آگی اغتشاشی کامپوزیت کردند و به این نتیجه رسیدند که پراکندگی ذرات با افزایش تعداد پاس‌ها بهبود پیدا می‌کند

تقویت‌کننده در قطعه شده و از تولید حفره جلوگیری می‌کند. شکل تصاویری از ابزارهای مورد استفاده در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی را نشان می‌دهد.

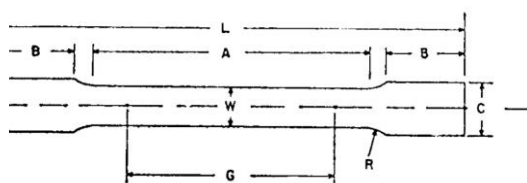
در این پژوهش، تنها پارامتر متغیر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی تعداد پاس‌ها (یک، سه و پنج پاس) می‌باشد. پس از انجام هر پاس، میز کار حرکت می‌کند تا به نقطه ابتدای فرآیند برسد. در شکل ۳ ایجاد لایه سطحی کامپوزیتی به روش فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نشان داده شده است.



شکل ۲- تصاویر ابزارهای مورد استفاده در این پژوهش



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



شکل ۴- شماتیکی از نمونه تست کشش [5]

برای تهیه نمونه‌های آزمون کشش، مطابق با استاندارد ASTM-E 8M نمونه‌های کامپوزیتی (یک، سه و پنج پاس) و بدون کامپوزیت از هر کدام 1 عدد در ابعاد مشخص شده برای آزمون

## ۲ مواد و روش تحقیق

فلز زمینه از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به صورت ورق مستطیلی به ابعاد ۵×۵×۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. ترکیب شیمیایی آلیاژ ۶۰۶۱ با آنالیز کوانتومتری بر اساس استاندارد E1251-11: 2016 اندازه گیری و در جدول ۱ ارائه گردیده است.

به منظور لایه کامپوزیتی می‌بایست پودر کاربید سیلیسیم به ناحیه عملیات اضافه گردد. در مرحله اول، توسط یک ماشین فرز، با استفاده از تیغه فرز، شیاری به عمق ۱ میلی‌متر و عرض ۲ میلی‌متر در سرتاسر طول قطعه آلومینیومی ایجاد گردید و پس از آن برای از بین بردن تمامی چربی‌ها و ناخالصی‌های موجود در سطح و درون شیار، قطعه شیار خورده درون محلول استون قرار گرفته است. در مرحله دوم، قطعه آلومینیومی شیار زده شده بر روی یک نگهدارنده (فیکسچرینگ) که وظیفه ثابت نگهداشتن نمونه را به عهده دارد، 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 میلی‌متر بر دقیقه، عمود بر سطح شیار حرکت کرده و در نهایت سطح شیار پر شده از ذرات تقویت‌کننده 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 تقویت‌کننده 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 تقویت‌کننده در سطح قطعه، ابزار اصلی درون سه نظام دستگاه بسته شد و بعد کله-گی ماشین در جهت عمود بر سطح قطعه  $\alpha=3$  درجه تغییر داده 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       | ۰/۱۸۹     |
| Mn       | ۰/۰۴۶۷    |
| Fe       | ۰/۳۴۲     |
| Si       | ۰/۶۸۹     |
| Cu       | ۰/۱۷۵     |
| Zn       | ۰/۰۲۴     |
| Ni       | ۰/۰۰۳۹    |
| Cr       | ۰/۲۱۶     |

در واقع این زاویه باعث اکستروژن خوب ماده از جلوی پین به پشت آن در حین فرآیند تولید شده و باعث توزیع بهتر ذرات

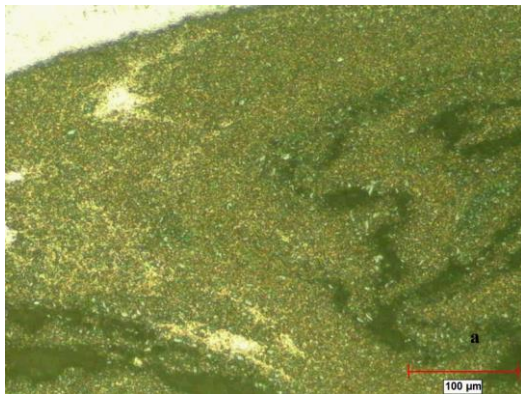


شکل ۸- دستگاه تست خستگی

### 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 نمونه‌های کامپوزیتی به وسیله میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت. شکل‌های 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 نشان داده و در شکل ۱۱ نیز ریزساختار آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است با افزایش تعداد پاس مساحت منطقه همگن افزایش پیدا کرده اما همچنان نواحی غیرهمگن به چشم می‌خورد بنابراین بهترین توزیع پودر کاربید سیلیسیم، مربوط به نمونه کامپوزیتی پنج پاس می‌باشد. این نمونه همگن‌ترین ساختار و بهترین توزیع پودر را دارد. افزایش تعداد پاس منجر به توزیع همگن و یکنواخت ذرات تقویت کننده می‌شود.



شکل ۹- کامپوزیت یک پاس

کشش از ناحیه کامپوزیتی و نمونه اولیه (آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱) استخراج شده است. شکل ۵ نمونه ای از تست کشش را نشان می‌دهد.

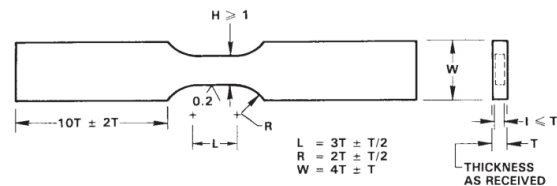
در این پژوهش از آزمایش‌های خستگی کم چرخه استفاده می‌کنیم. ابعاد نمونه‌های این تست بر اساس استاندارد ۶۰۶-۹۲ ASTM E تهیه شده است. شماتیکی از ابعاد نمونه‌های تست را در شکل ۶ مشاهده می‌نمایید.

نمونه‌های آزمون خستگی، مطابق با استاندارد ASTM E ۶۰۶-۹۲ برای تست خستگی کم چرخه، ۴ نمونه کامپوزیتی (یک، سه و پنج پاس) و بدون کامپوزیت در ابعاد مشخص شده طبق استانداردهای سیکل کم چرخه تهیه شده است. این نمونه‌ها به وسیله یک دستگاه خستگی کششی- فشاری تحت آزمایش خستگی کم چرخه قرار گرفته است. شکل ۷ نمونه‌ای از تست خستگی کم چرخه را نشان می‌دهد.

همانطور که قبلاً ذکر شد، روش ارائه داده‌های مهندسی در رفتار خستگی کم چرخه، استفاده از نمودار N-S است که در آن تنش نسبت به عمر خستگی برحسب تعداد سیکل‌ها تا شکست ارائه می‌شود. در این نمودار، تقریباً همواره برای N یک مقیاس لگاریتمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار تنش S نیز می‌تواند دامنه تنش یا تنش ماکزیمم باشد. در این پژوهش نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و نمونه‌های کامپوزیتی (یک، سه و پنج پاس) توسط دستگاه تست خستگی کشش - فشار موجود در دانشگاه صنعتی شریف تحت آزمایش خستگی کم چرخه قرار گرفتند.



شکل ۵- نمونه تست کشش



شکل ۶- ابعاد و هندسه نمونه‌های تست خستگی کم چرخه [6]

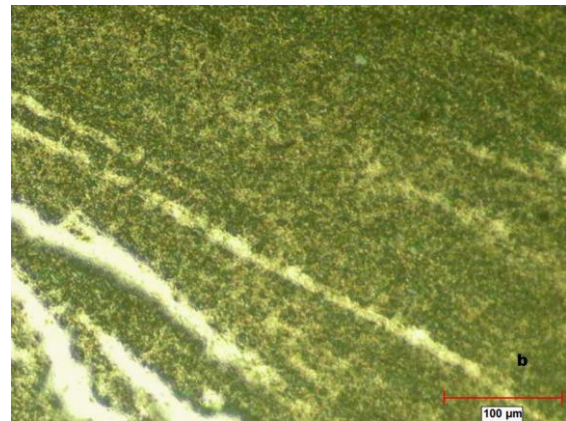


شکل ۷- نمونه تست خستگی کم چرخه

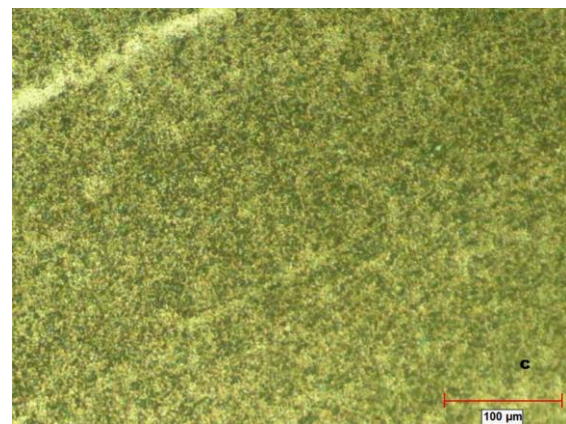
توزیع پودر مناسبی انجام نشده است اما به دلیل حرارت ورودی مطلوب ایجاد شده اندازه ذرات نسبت به نمونه پنج پاس و سه پاس کاهش یافته است. در واقع در این نمونه میانگین اندازه ذرات به دلیل تبلور مجدد دینامیکی و کاهش دما، کاهش می‌یابد.

شکل ۱۰، 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 نشده است. 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 هم‌زده، دانه‌ها شکسته می‌شوند و مرزدانه‌هایی با زاویه کم ایجاد شده است [7]. این نقاط، نقاط مناسبی برای جوانه‌زنی هستند. در این نقاط تبلور مجدد رخ داده که موجب ایجاد یک ساختار ریزدانه در منطقه هم‌زده شده است [8]. در بازیابی مکانیکی، مرزدانه‌ها با زاویه کم به مرزدانه‌های با زاویه زیاد تبدیل شده و همین تبدیل موجب بزرگ شدن دانه‌ها شده است [9]. حرکت مرزدانه یک پدیده نفوذی بوده که با افزایش دما حرکت آن تسریع شده و می‌تواند منجر به درشت شدن دانه‌های تبلور مجدد یافته شود. در منطقه تحت تأثیر حرارت آبخشی از رسوب‌ها با ابعاد درشت در مرزدانه‌ها رسوب نموده و با ایجاد تردی در مرزدانه‌ها سبب کاهش مقاومت به شکست شده است.

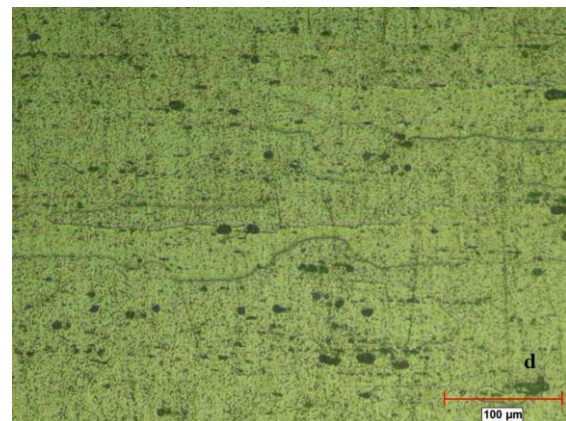
شکل ۱۱، ریزساختار ناحیه اغتشاشی پنج پاس را نشان می‌دهد. با بررسی ریزساختار نمونه پنج پاس مشاهده گردید، حفره وجود ندارد، ذرات به‌خوبی هم‌زده شده‌اند. توزیع ذرات نسبت به نمونه‌های یک پاس و سه پاس به خوبی انجام شده است و فاصله ذرات زیاد می‌باشد. در نمونه پنج پاس مشاهده گردید، اندازه متوسط ذرات کاربید سیلیسیم از زیر ۱ میکرون، تا ۱۲ میکرون وجود دارد. در این نمونه ریزدانه شدن ذرات کاربید سیلیسیم (زیر یک میکرون) به توزیع پودر مناسب مربوط می‌شود. زیرا ذرات تقویت‌کننده می‌توانند مانند مانعی در برابر حرکت مرزدانه‌ها عمل کنند و با محدود کردن حرکت آن‌ها، از درشت شدن ذرات جلوگیری کنند [10]. 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 مرزدانه‌ها جلوگیری می‌کند. در این نمونه میانگین اندازه ذرات به ۱۲ میکرون



شکل ۱۰- کامپوزیت سه پاس



شکل ۱۱- کامپوزیت پنج پاس



شکل ۱۲- آلیاژ آلومینیوم 6061

شکل ۹، ریزساختار نمونه ناحیه اغتشاشی یک پاس را نشان می‌دهد. با بررسی ریزساختار 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 مترکم هستند، تجمع ذرات وجود دارد. اندازه متوسط ذرات کاربید سیلیسیم حدود ۴ تا ۱۰ میکرون می‌باشد. در این نمونه همانطور که توضیح داده شد

ناحیه عملیات گرما مکانیکی<sup>۶</sup> 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 زیادتر شود عیب نفوذ ناقص ریشه باعث کاهش خواص خواهد شد.

همچنین میسرا و همکارانش [13]، مشاهده کردند که حداکثر حرارت در سطح پین و شولدر، در بیرون فصل مشترک کاهش می‌یابد. دمای فرآیند، نرخ خنک سازی 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 دانه‌تر 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 [14].

رابطه کلی بین تنش تسلیم (که معیاری برای سنجش استحکام مواد است) و اندازه ذرات توسط دانشمندیان به نام هال-پیچ<sup>۷</sup> توسعه گردید که به رابطه هال-پیچ مشهور است که رابطه (1) استحکام تسلیم با اندازه میانگین ذرات را نشان می‌دهد.

$$\sigma_0 = \sigma_i + kD^{-0.5} \quad (1)$$



شکل ۱۳- نمونه آزمون کشش پس از شکست

در این رابطه  $\sigma_0$  تنش تسلیم و  $\sigma_i$  تنش اصطکاکی که معرف مقاومت کلی شبکه بلوری در برابر حرکت نقص‌های بلوری است مسئول تغییر شکل مواد است. در رابطه (1)،  $k$  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. در شکل ۱۴ منحنی تغییرات استحکام مواد با تغییر اندازه ذرات نشان داده شده است. 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 10 نانومتر) ادامه پیدا می‌کند و پس از آن با کاهش اندازه

هم می‌رسد که نسبت به نمونه یک پاس افزایش اندازه ذرات را شاهد هستیم. علت آن، غلبه عامل گرما بر اثر پینینگ ذرات تقویت‌کننده است که از کوچک‌تر شدن بیشتر اندازه دانه جلوگیری کرده است. همانطور که توضیح داده شد، اندازه متوسط ذرات نمونه سه پاس 8 تا 14 میکرون است و نمونه پنج پاس از زیر یک میکرون تا 12 میکرون هم می‌رسد. دلیل اینکه اندازه ذرات نمونه پنج پاس نسبت به سه پاس کاهش یافته است این است که در نمونه پنج پاس وجود ذرات تقویت‌کننده به عنوان مانعی در برابر رشد دانه‌ها عمل می‌کنند و دقیقاً به مانند ناپجایی‌ها از رشد بیشتر آن‌ها جلوگیری می‌شود. این پدیده همانطور که توضیح داده شد، تحت عنوان پینینگ شناخته می‌شود [11] که موجب ریزدانه تر شدن می‌شود و عامل اصلی کاهش اندازه در نمونه‌های کامپوزیتی 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 ۱۲، تصویر میکروسکوپی 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 نمونه‌ای از تست کشش بعد از شکست را نشان می‌دهد. در نمونه یک پاس همانطور که در قسمت قبلی ذکر شد، باتوجه 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 ریزدانه‌تر باشد، جوانه زنی ترک دیرتر انجام خواهد شد و رشد ترک با سرعت کمتری اتفاق خواهد افتاد. طبق رابطه و نمودار هال-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.

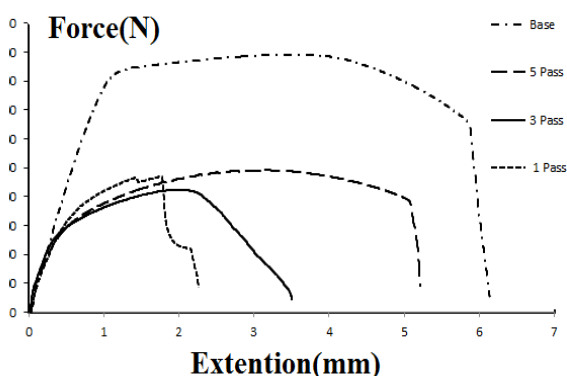
تغییر سرعت چرخش و سرعت انتقالی بر روی خواص مکانیکی تأثیر می‌گذارد. عباسی و همکارانش [12]، مشاهده کردند که با افزایش نسبت سرعت چرخش به سرعت پیشروی، کاهش ناپجیزی در خواص کششی در مناطق مختلف ناحیه اغتشاشی‌هو

7. Hall-Petch

5. Zone Stir (SZ)

6. Thermo Mechanically Affected Zone (TMAZ)

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 شدن ذرات ریزساختار کامپوزیتی پنج پاس شده نسبت به نمونه یک پاس شده است [17]. 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 ۱۵- منحنی تنش- کرنش مربوط به نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم 6061، کامپوزیت‌های یک پاس، سه پاس و پنج پاس [16]

### ۳.۳ رفتار خستگی

در خستگی کم چرخه، مرحله رشد ترک خستگی کنترل کننده عمر خستگی است و در کامپوزیت‌ها به دلیل بیشتر شدن نرخ رشد ترک، عمر خستگی کم چرخه کمتر از زمینه بدون تقویت کننده پیش بینی می‌شود [18]. در فرآیند خستگی در سطوح تنشی زیاد، عمر خستگی پایینی به دست می‌آید از جمله دلایل این امر، تمرکز تنش بالا در نوک میکرو حفره‌ها و تخلخل‌ها و در نتیجه افزایش نرخ میکرو حفره‌ها ذکر شده است. در صورت ایجاد میکروترک‌ها، رشد اشاعه آن‌ها افزایش یافته و در نهایت باعث شکست سریع‌تر در سطوح تنشی بالا می‌شود [19].

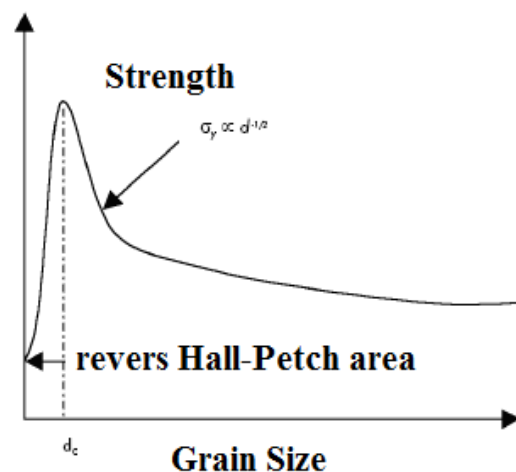
در خستگی کم چرخه برخلاف خستگی پرچرخه، کرنش‌های پلاستیکی وجود دارند. تنش اعمالی از تنش تسلیم ماده بیشتر است. در این حالت، جوانه زنی ترک به سرعت اتفاق می‌افتد و مرحله رشد ترک خستگی کنترل کننده عمر خستگی است و سهم بالایی از عمر خستگی را مرحله رشد ترک خستگی تا شکست به خود اختصاص می‌دهد. به طور کلی، مشاهده شده است که حد خستگی در فلزات با کاهش اندازه، افزایش و نرخ رشد ترک افزایش می‌یابد برای آلومینیوم فوق ریزدانه، عمر خستگی کم چرخه به دلیل کاهش شکل پذیری با کاهش اندازه کاهش می‌یابد [20].

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 [15].

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 می‌باشد. در شکل ۱۵ منحنی تنش- کرنش نمونه‌ها نشان داده شده است.

جدول ۲- نتایج آزمون کشش

| نمونه            | استحکام نهایی (MPa) | تسلیم (MPa) | درصد بهبود |
|------------------|---------------------|-------------|------------|
| آلومینیوم        | ۲۹۰                 | ۲۴۰         |            |
| کامپوزیت یک پاس  | ۴۶۹                 | ۴۶۴         | ۴۸٪        |
| کامپوزیت سه پاس  | ۴۲۳                 | ۳۸۵         | ۳۷٪        |
| کامپوزیت پنج پاس | ۴۹۱                 | ۴۲۵         | ۴۳٪        |



شکل ۱۴- منحنی تغییرات استحکام مواد با تغییر اندازه [15]

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 می‌یابد. افزایش قدرت اغتشاش پین منجر به توزیع ذرات تقویت کننده در فاز زمینه می‌شود که با توجه به قفل کنندگی ذرات تقویت کننده فاز زمینه، افزایش محل‌های مستعد برای جوانه زنی

ذکر شده، این نتیجه حاصل گردید که شکست در انتهای ناحیه اغتشاشی انجام شده است.

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

| نمونه     | ماکزیمم بارگذاری (MPa) | سیکل شکست | درصد بهبود |
|-----------|------------------------|-----------|------------|
| آلومینیوم | ۲۷۵                    | ۳۵۲       |            |
| یک پاس    | ۱۳۵                    | ۱۱        | -          |
| سه پاس    | ۱۳۵                    | ۱۶        | ۳۱٪        |
| پنج پاس   | ۱۳۵                    | ۱۷        | ۵٪         |

#### ۴ نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، کامپوزیت پایه آلومینیوم 6061 تقویت شده با ذرات کاربید سیلیسیم تولید شد. در این پژوهش، با افزایش تعداد پاس توزیع مناسبی از ذرات تقویت‌کننده در زمینه به دست می‌آید. در این پژوهش قدرت اغتشاش بین، منجر به توزیع بهتر ذرات تقویت‌کننده در فاز زمینه شد. البته شایان ذکر است، نمونه کامپوزیتی سه پاس جهت تست خستگی کم 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 تقویت‌کننده با افزایش تعداد پاس صورت گرفت ولی به دلیل افزایش حرارت ورودی، سایز ذرات در نمونه کامپوزیتی سه و پنج پاس درشت‌تر از یک پاس شد. 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-پیچ، استحکام تسلیم با اندازه ذرات رابطه معکوس دارد. در نمونه کامپوزیتی که اندازه ذرات آن از همه ریزتر است، استحکام تسلیم آن بیشتر است. بنابراین قانون، استحکام تسلیم نمونه کامپوزیتی یک پاس به دلیل ریزتر بودن ذرات تقویت‌کننده‌اش بیشتر است و پس آن با توجه به اندازه ذرات نمونه پنج پاس و سپس نمونه سه پاس بیشتر است. استحکام تسلیم

تحت شرایط تنش‌های نامی بالا (یعنی عمر کوتاه‌تر از  $10^4$  چرخه)، آزمایش دامنه تنشی ثابت فقط داده‌های محدودی ارائه می‌کند. این امر به دلیل کرنش پلاستیک نسبتاً بزرگ به وجود آمده در نمونه است. عموماً از بارگذاری کشش - فشار محوری استفاده می‌شود.

شکل ۱۶ نمونه‌ای از تست خستگی پرچرخه بعد از شکست را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶- نمونه آزمون خستگی کم‌چرخه پس از شکست

در جدول ۳ نتایج آزمایش خستگی نشان داده شده است. نمونه اولیه: تحت بارگذاری ۲۷۵ مگاپاسکال کم‌چرخه قرار گرفته است. مقدار بارگذاری این نمونه نسبت به دو نمونه قبلی بیشتر است و تعداد سیکل خیلی کمتری نسبت به دو نمونه قبلی طی کرده است. ضمن اینکه نوع سیکل در این آزمایش کم‌چرخه می‌باشد. بنابراین در تنش‌های چرخه بالاتر (خستگی کم چرخه) کرنش‌های پلاستیکی وجود دارند. در این حالت جوانه‌زنی ترک اتفاق می‌افتد. بنابراین شکست در تعداد سیکل کمتری رخ می‌دهد. کمترین مقدار ماکزیمم تنش در بارگذاری مربوط به این نمونه می‌باشد و نمونه ذکر شده نسبت به نمونه‌های اولیه همانطور که انتظار می‌رفت دارای تعداد بیشتری می‌باشد.

نمونه کامپوزیتی یک پاس: تحت بارگذاری ۱۳۵ مگاپاسکال کم‌چرخه قرار گرفته است. پس از انجام تست با مشاهدات سطح شکست نمونه ذکر شده می‌توان چنین بیان کرد که شکست از ناحیه اغتشاشی و در فصل مشترک ذرات فاز تقویت‌کننده تجمع یافته و فاز زمینه رخ داده است و این بیانگر این است که ذرات کاربید سیلیسیم در فاز زمینه به خوبی هم زده نشده است. به این دلیل تعداد سیکل کمی را طی کرده است.

نمونه کامپوزیتی سه پاس: تحت بارگذاری ۱۳۵ مگاپاسکال کم‌چرخه قرار گرفته است. این نمونه تعداد پاس سیکل بیشتری را نسبت به نمونه قبلی طی کرده است. بعد از انجام تست، از مشاهدات سطح شکست، به وضوح مشخص است که شکست در انتهای ناحیه اغتشاشی صورت گرفته است و این نشان دهنده این است که نمونه کامپوزیتی سه پاس نسبت به نمونه قبلی به درستی هم زده شده است.

نمونه کامپوزیتی پنج پاس: تحت بارگذاری ۱۳۵ مگاپاسکال کم‌چرخه قرار گرفته است. این نمونه نسبت به دو نمونه قبلی سیکل بیشتری را طی کرده است. بعد از مشاهده سطح شکست در نمونه

[9] D. Yadav, R. Bauri, Nickel Particle embedded Aluminium matrix composites with high ductility, *Materials Letters*, Vol. 64, No. 6, pp. 664- 667, 2010.

[10] P. Asadi, G. Faraji, M. Besharati, producing of AZ91/Sic composite by Friction Stir Processing (FSP). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, volume 51, Issues 1- 4, pp. 247- 260, 2010.

[11] M. Rayes, E. Danaf, the influence of multi- pass Friction Stir Processing on the microstructural and mechanical properties of Aluminium alloy 6082, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 17, pp.4419- 4430, 2002.

[12] M. AbbasiGharacheh, AH. Kokabi, GH. Daneshi, B. shalch, R. Sarrafi, The influence of ratio of “rotational speed /traverse speed” on mechanical properties of AZ31 Friction Stir Welds *International Journal of machine Tools and manufacture*, Vol. 46, No. 15, pp. 1983- 1987, 2006.

[13] R. S. Mishra, Z. Y. Ma, “Friction stir welding and processing”, *Materials Science and Engineering R*, Vol. 50, pp. 1- 78, 2005.

[14] C.I. Chang, X. H. Du, J. C. Huang, Achieving ultrafine grain size in Mg-Al-Zn alloy by Friction Stir Processing. *Scripta Materiala*. Vol. 57. Issues 3. pp. 209- 212, 2007.

[15] K. Chawla, Metal-matrix composites in ground transportation. Vol JOM, 2006. 58(11): pp. 67-70, 2006.

[16] Kalashnikova, T.; Knyazhev, E.; Gurianov, D.; Chumaevskii, A.; Vorontsov, A.; Kalashnikov, K.; Teryukalova, N.; Kolubaev, E. Structure, Mechanical Properties and Friction Characteristics of the Al-Mg-Sc Alloy Modified by Friction Stir Processing with the Mo Powder Addition. *Metals* 2022, 12, 1015.

[17] M. Azizieh, A. H. Kokabi, p. Abachi, “Effect of rotational speed and probe profile on microstructure and hardness of AZ31/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano composites fabricated by Friction Stir Processing”, *Materials & Design*, Vol.32, pp.2034 -2041, 2011. (in Persian).

[18] B. Park, A. Crosky, A. Hellier, High cycle fatigue behaviour of microsphere Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- Al particulate metal matrix composites. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 39(7): pp. 1257- 1269, 2008.

[19] P. SahandiZangabad, Investigation on Fatigue Behaviour of Al<sub>5</sub>O<sub>5</sub>/Al<sub>3</sub>Ti-Mg Nano Composites Fabricated by Friction Stir Processing, Sharif University of Technology, pp.88-130, 2014. (in Persian).

[20] R. Stephnes. A, fatemi, H. Fuchs, metal fatigue in Engineering, ISBN964- 6577- 24- 5, pp. 1- 18, Power Research Institute, Iran, 2001.

ورق خام (آلیاژ آلومینیوم 6061) نسبت به نمونه‌های کامپوزیتی به دلیل ریزساختار مربوط به ناحیه اغتشاشی بیشتر شد.

بیشترین عمرخستگی کم‌چرخه، مربوط به نمونه کامپوزیتی پنج پاس، تحت بارگذاری ماکزیمم ۱۳۵ مگاپاسکال است و کمترین عمر خستگی مربوط به نمونه کامپوزیتی یک پاس، تحت بارگذاری ماکزیمم ۱۳۵ مگاپاسکال است.

در فرآیند خستگی در سطوح تنشی زیاد (خستگی کم چرخه)،

عمرخستگی پائینی به دست آمد به دلیل اینکه در این نوع سیکل کرنش‌های پلاستیکی وجود دارند و جوانه‌زنی ترک به سرعت انجام می‌شود.

## ۵ مراجع

[1] W. Smith, *Structure and Properties Engineering Alloys*, pp.1-3 McGraw, University of Central Florida, 2002.

[2] H. Nami, Production of Al /TiO<sub>2</sub> composite layer by Friction Stir Processing, Sharif University, pp. 50- 68, 2011, (in Persian).

[3] W. Wang, Q Shi.P. Liu, H. Li, novel way to produce bulk sic reinforced aluminium metal matrix composites by friction stir processing. *journal of materials processing technology*, Vol. 209(4), pp. 103- 2099, 2009.

[4] N. Kiajamali, M. Eslami, A. K. Sajjadi, Effect of surface composite layers producing via friction stir processing on mechanical properties. Tehran University of Technology, The first international conference and the 6th joint conference of the Iranian Metallurgical Engineering Association, pp. 2- 5, 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. Designation: E 8M- 00b, pp. 1- 3, United States, METRIC. 2001.

[6] D. T. Raske and Morrow, Hand book Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing1, Designation: E 606 – 92, pp. 1- 9, United States, 1998.

[7] Z. Y. Ma, R. a. Mishra, Mahoney superplastic deformation behavior of Friction Stir Processing Al7075 alloy, *ActaMaterialia*, Vol. 50, No. 17, pp. 4419- 4430, 2002.

[8] F. J. Humphreys, P. B. Prangnell, R. Priesthner, Fine- grained alloys by thermomechanical processing, current opinion in solid state and Materials Science, Vol. 5, No. 1, pp. 15- 21, 2001.