

The effects of nanosized SiC particles on mechanical properties and wear behavior of AZ91/Mg₂Si/5%SiC hybrid composites

Mohammad Zarghami¹, *Mehdi Malekan², Massoud Emamy³

1- Ph.D., School of Metallurgy and Materials Engineering, Alborz Campus, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Associate Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Citation: Zarghami M, Malekan M, Emamy M. The effects of nanosized SiC particles on mechanical properties and wear behavior of AZ91/Mg₂Si/5%SiC hybrid composites, Metallurgical Engineering, 2024; 27(2): 77-88 <https://doi.org/10.22076/me.2024.2006605.1382>

 <https://doi.org/10.22076/me.2024.2006605.1382>

ABSTRACT

Hybrid composites provide a combination of properties such as tensile modulus, compressive strength and wear resistance, which cannot be obtained in ordinary composite materials. Usually, these composites involve one or two ex-situ and in-situ reinforce particles. In this study, the hybrid composite AZ91/Mg₂Si/5wt%SiCP with micron-sized SiC particles was selected and, 1 and 2wt% nano-sized SiC were added to this composite. The present study investigated the effect of bimodal size SiC particles on the microstructure, mechanical, and wear properties of the cast and extruded composites and compared to the composites with micron-sized SiC reinforcement and base alloy. The presence of Mg₂Si and nano-sized SiC particles had positive influence on the microstructure refinement and decrement of the grain size. The results show that the adding of 1 and 2wt% nano-sized SiCp significantly improved the microstructure, mechanical properties and wear resistance of the AZ91 alloy after hot extrusion. Using a less amount of micro particles along with nano particles is a proper choice to improve mechanical properties and wear resistance.

Keywords: Hybrid composite; Hot extrusion; Microstructure; Mechanical properties; Wear behavior.

Received: July 11, 2023

Accepted: February 19, 2024

■ ■
*Corresponding Author:

Mehdi Malekan, PhD

Address: School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Tel: +98 (21) 8208 4610

E-mail: mmalekan@ut.ac.ir

تاثیر ذرات نانومتری SiC بر خواص مکانیکی و رفتار سایش کامپوزیت های هیبریدی AZ91/Mg-2Si/5%SiC

محمد ضربغامی^۱، *مهدی ملکان^۲، مسعود امامی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس البرز دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

کامپوزیت های هیبریدی ترکیبی از خواص نظیر مدول کششی، استحکام فشاری و مقاومت به سایش را فراهم می کنند که در مواد کامپوزیتی معمولی قابل حصول نیست. معمولاً در این نوع کامپوزیت ها از یک یا دو جز تقویت کننده خارجی به همراه ذرات تشکیل شده در داخل آلیاژ به عنوان تقویت کننده درجا استفاده می شود و حسن این روش استفاده همزمان از مزایا و خواص مثبت این تقویت کننده ها است. در این پژوهش، کامپوزیت هیبریدی $AZ91/Mg_2Si/5wt\%SiC$ حاوی ذرات میکرومتری SiC انتخاب شده و مقادیر ۱ و ۲ درصد وزنی ذرات نانومتری SiC به این کامپوزیت اضافه شدند. ریزساختار، سختی، استحکام فشاری و همچنین رفتار سایشی نمونه های آلیاژ پایه AZ91 و کامپوزیت های مذکور در دو حالت ریختگی و اکستروژنه بررسی و مقایسه شدند. بررسی های ریزساختاری نشان دادند که با حضور Mg_2Si و افزایش نانو ذرات SiC، اندازه دانه کاهش یافته است. با افزودن مقادیر ۱ و ۲ درصد ذرات نانومتری SiC، میزان سختی، استحکام فشاری و مقاومت به سایش در دو حالت ریختگی و اکستروژنه نسبت به کامپوزیت حاوی ۵ درصد ذرات میکرومتری SiC و همچنین آلیاژ زمینه، افزایش قابل ملاحظه ای را نشان داد. در نتیجه، استفاده همزمان از مقادیر کمتر ذرات میکرو و نانومتری در مقایسه با کامپوزیت های حاوی مقادیر بالاتر ذرات میکرومتری گزینه بهتری جهت افزایش خواص مکانیکی و مقاومت به سایش است.

واژه های کلیدی: کامپوزیت هیبریدی؛ اکستروژن داغ؛ ریزساختار؛ خواص مکانیکی؛ مقاومت به سایش

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۰ | پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰

۱. مقدمه

مهمترین چالش های بزرگ صنعت دنیا در رابطه با سیستم حمل و نقل، کاهش وزن، حفظ محیط زیست و کاهش آلودگی هوا بدون کاهش عملکرد وسایل نقلیه است. کامپوزیت های زمینه فلزی^۱ به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، مورد توجه محققان و صنعتگران بسیاری واقع شده است. اخیراً کامپوزیت های هیبریدی که با توجه به بازده بالا، عملکرد عالی ساختاری و کاربردهای پایه گذاری شده اند به سرعت در حال توسعه هستند. بطور کلی، تحقیقات گسترده ای در خصوص تاثیر انواع تقویت کننده ها بر خواص مکانیکی و ساختاری آلیاژهای مختلف منبجیم انجام شده و سهم تقویت کننده های SiC و Al_2O_3 از بقیه بیشتر است. کامپوزیت های زمینه منبجیمی که با روش واکنش درجا ساخته می شوند همواره در حال رشد و توسعه هستند. کامپوزیت های درجا خواص ریزساختاری و مکانیکی برتر نسبت به آلیاژهای جاری خودشان دارند. برخی عناصر مانند Ca، Sb و Li در اصلاح و بهسازی فاز Mg_2Si و فازهای بین فلزی دیگر تاثیرگذار

هستند. در بین این عناصر، Ca نقش مثبت بیشتری ایفا می کند. با افزایش درصد مناسب Ca کامپوزیت های منبجیمی حاوی Mg_2Si بهبود یافته و مورفولوژی آنها از دندردیتی به شکل چند وجهی و همچنین فاز Mg_2Si یوتکتیک به میله های ریزتر تبدیل شده و استحکام نهایی و انعطاف پذیری بهبود می یابد [۱].

یکی از عوامل عمده کاربرد کامپوزیت های تقویت شده با ذرات سرامیکی، خواص مکانیکی و متالورژیکی بهینه آنها، از قبیل مدول الاستیسیته، استحکام و پایداری حرارتی بالا، است. کامپوزیت زمینه فلزی تقویت شده با ذرات، شامل ترکیبی از خواص فلز زمینه (نرمی، قابلیت چکش خواری و چقرمگی) و خواص ماده تقویت کننده (استحکام و مدول بالا) است که باعث می شود استحکام برشی و فشاری کامپوزیت افزایش یافته و پایداری حرارتی آن بهبود یابد [۲]. فاز زمینه نقش مهمی در رفتار کامپوزیت دارد. زمینه، نه تنها در تثبیت تقویت کننده ها نقش موثری دارد و به انتقال نیرو به تقویت کننده ها کمک می کند، بلکه در عملکرد کلی کامپوزیت موثر

1 - Metal Matrix Composites (MMC)

* نویسنده مسئول:

دکتر مهدی ملکان

نشانی: تهران، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد

تلفن: ۰۲۱ ۸۲۰۸۴۶۱۰ (۲۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: mmalekan@ut.ac.ir

مقادیر تقویت کننده افزایش پیدا کرده و نرخ سایش کامپوزیت کم تر از آلیاژ پایه بدون تقویت کننده های کاربید سیلیسیم و گرافیت خواهد بود. این امر به وضوح به دلیل آزاد شدن ذرات SiC و گرافیت به وسیله نمونه های کامپوزیت به سمت سطح جفت شونده در طی لغزش است که در نتیجه مقاومت را در برابر سایش ایجاد می کند [۱۴].

در این پژوهش، کامپوزیت هیبریدی $AZ91/Mg_2Si/5\%SiC_p$ حاوی ذرات میکرومتری SiC انتخاب شده و مقادیر ۱ و ۲ درصد ذرات نانومتری SiC به این کامپوزیت اضافه شدند. ریزساختار، سختی، استحکام فشاری و همچنین رفتار سایشی نمونه های آلیاژ پایه AZ91 و کامپوزیت های مذکور در دو حالت ریختگی و اکستروژن شده بررسی و مقایسه شدند.

۲. مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، برای ساخت نمونه های آلیاژ پایه AZ91 از منیزیم خالص (% ۹۹/۹۸) و آمیزان های $Mg-50\% Zn$ و $Mg-50\% Al$ استفاده شد. تمامی مواد اولیه تا دمای $150^\circ C$ پیش گرم شده و سپس این شمش ها در یک بوته گرافیتی و با استفاده از کوره القایی ذوب شدند. برای جلوگیری از اکسید شدن و آتش گرفتن منیزیم از گاز محافظ $5\% SF_6 + CO_2$ استفاده شد. بعد از هم زدن به مقدار مناسب و ذوب کامل همه ی شمش ها، سرباره گیری انجام شد و ذوب ریزی در دمای $750^\circ C$ صورت گرفت. به منظور ساخت کامپوزیت درجاً $AZ91-3Si-0.3Ca$ ($AZ91/5 wt\% Mg_2Si$)، آمیزان های $Mg-10\% Si$ و $Mg-20\% Ca$ به مذاب آلیاژ AZ91 با شرایط فوق اضافه گردید. افزودن کلسیم با مقدار بهینه ۰/۳ درصد به مذاب، باعث اصلاح ساختار و ریز کردن اندازه ذرات Mg_2Si و ترکیبات بین فلزی می گردد [۱۵]. با توجه به اینکه تقریباً کل ۳% سیلیسیم اضافه شده به مذاب تبدیل به Mg_2Si می شود، لذا نزدیک به ۵% وزنی فاز Mg_2Si اولیه و بقیه به شکل Mg_2Si یوتکتیک تشکیل می شود.

برای ساخت کامپوزیت های هیبریدی حاوی ذرات میکرومتری SiC و نانومتری SiC، با توجه به تحقیقات قبلی نویسندگان [۱۶]، کامپوزیت هیبریدی $AZ91/Mg_2Si/SiC_p$ حاوی ۵ درصد وزنی ذرات میکرومتری SiC با اندازه حدود ۲۵ تا ۴۰ میکرومتر که نتایج مناسب تری در آزمون های مکانیکی و سایش داشت، انتخاب گردید و به تفکیک مقدار ۱ و ۲ درصد ذرات نانومتری SiC با اندازه حدود ۵۰ تا ۸۰ نانومتر به مذاب این کامپوزیت اضافه گردید. به منظور اطمینان از توزیع مناسب ذرات، هم زدن مذاب بصورت گردابی توسط یک پره چهار پر فولادی با سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه نیز انجام گرفت. جهت جلوگیری از آلوده شدن ذرات و توزیع یکنواخت ذرات، ذرات نانومتری SiC با پودر Al با روش آسیاب سیاره ای با نسبت ۲۰ به ۸۰ مخلوط شده (با شرایط نسبت گلوله به پودر ۲۰ به ۱ و با سرعت ۳۵۰ متر بر ثانیه به مدت ۱۰ ساعت) و برای جلوگیری از چسبیدن پودر به گلوله ها از ۲ درصد اسید استاریک استفاده شد. با توجه به اینکه آلیاژ پایه و کامپوزیت های دیگر حاوی حدود ۹% آلومینیم هستند در هنگام آلیاژ سازی و تهیه مذاب، مقدار آلومینیم اضافه شده از این طریق دقیقاً محاسبه شده و بقیه آلومینیم مورد نیاز به صورت خالص اضافه شده است. به عبارت دیگر، کلیه نمونه ها دارای آلومینیم حدود ۹% بودند. به دلیل نرمی زیاد آلومینیم و سختی زیاد ذرات SiC، در اثر آسیاب نانو ذرات به داخل پودر های آلومینیم نفوذ کرده و پوشش آلومینیم روی ذرات باعث تر شدگی بیشتر ذرات با مذاب شده و از آلوده شدن ذرات جلوگیری می کند [۱۷]. بعد از تهیه مذاب، هر کدام از نمونه های کامپوزیتی فوق در چند قالب استوانه ای با ارتفاع ۴۵

است [۳]. از طرف دیگر، عملکرد کامپوزیت های زمینه منیزیمی، به نوع و اندازه تقویت کننده، ترکیب آلیاژ پایه، فناوری و روش ساخت بستگی دارد [۴]. به علت قیمت پایین ذرات SiC و امکان توزیع یکنواخت این ذرات جهت ساخت و تقویت کامپوزیت های زمینه منیزیمی، این ذرات بیشتر از سایر تقویت کننده ها کاربرد داشته اند [۵]. مسئله ای اصلی در تولید نانو کامپوزیت ها، آغشته پذیری کم ذرات سرامیکی با فلز مذاب زمینه است که اجازه ی تولید نانو کامپوزیت ها را با فرآیندهای ریخته گری سنتی نمی دهد. پودر های متراکم در حقیقت مستعد به تشکیل خوشه هستند که در نتیجه قابلیت توزیع همگن در میان زمینه را به جهت بهره برداری از یک پتانسیل استحکام دهی، از بین می برد. ذرات SiC، ترشوندگی و پایداری بهتری در مذاب منیزیم دارند [۶]. با پیش گرم کردن و اکسیداسیون ذرات SiC می توان بر عدم ترشوندگی غلبه کرد [۷]. از بین تقویت کننده ها، کامپوزیت های زمینه منیزیمی تقویت شده با ذرات SiC، استحکام، مدول الاستیک و مقاومت به خزش بهتری از خود نشان داده اند [۸].

در حال حاضر پژوهشگران علاقه بسیار زیادی را در خصوص مطالعه ی فرآیندهای ثانویه روی کامپوزیت های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات سرامیکی با مقیاس میکرومتری ابراز نموده اند. فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک مختلفی از جمله اکستروژن، نورد و فورجینگ جهت بهبود استحکام و انعطاف پذیری کامپوزیت های تقویت شده با ذرات میکرومتری به صورت موفقیت آمیز به کار گرفته شده است [۹]. در میان این روش ها، اکستروژن به دلیل مزایای اقتصادی و فنی اش در تولید اجزای ساختاری بسیار پر کاربرد است. فرآیند اکستروژن داغ، یک روش تغییر شکل ثانویه جهت بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت های زمینه منیزیمی از طریق حذف عیوب ریختگی نظیر مک های ریز است. همچنین این فرآیند، باعث توزیع مجدد ذرات SiC و در نتیجه اصلاح و ریزدانه ی زمینه می شود [۱۰]. در کامپوزیت های اکستروژن شده با افزایش ذرات SiC، اندازه دانه کاهش یافته، استحکام و مدول الاستیک افزایش، اما انعطاف پذیری کاهش نشان می دهد [۱۱]. به خوبی اثبات شده است [۱۲] که ذرات میکرومتری SiC می توانند تبلور مجدد دینامیکی (DRX) زمینه را در طی عملیات اکستروژن داغ ترویج دهند. در حالی که DRX حساس به مقادیر موضعی ذرات تقویت کننده در زمینه است، به طور مثال اندازه دانه معمولاً با افزایش مقدار ذرات میکرومتری SiC کاهش می یابد. افزودن SiC_p نانومتری مانع مهاجرت مرزدانه در زمینه شده و در نتیجه دانه ها ریز تر می شوند.

در مطالعات مختلف ثابت شده است که خواص مکانیکی و مقاومت به سایش کامپوزیت ها با افزایش ذرات تقویت کننده مختلف نظیر SiC، Al_2O_3 ، TiC و B_4C بهبود یافته است. مقایسه صورت گرفته در مقاومت به سایش در کامپوزیت های زمینه AZ91، نشان می دهد که تأثیر تقویت کننده SiC در افزایش مقاومت به سایش بیشتر از B_4C بوده است [۱۳]. در یک پژوهش، رفتار سایشی کامپوزیت هیبریدی حاوی مقادیری از گرافیت و کاربید سیلیسیم مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده است که در نیروهای سایش بالا یک انتقال از سایش خفیف به شدید اتفاق افتاده که در پی آن با افزایش بیشتر نرخ سایش همراه بوده که در این شرایط، از بین رفتن و تشکیل لایه های اکسیدی سریع تر صورت گرفته و مکانیزم سایش به نوع لایه لایه شونده برای همه ی کامپوزیت ها تغییر پیدا کرده است، بدین وسیله به طور نسبی منجر به افزایش در نرخ سایش شده است [۱۴]. تحقیقات نشان می دهند که نیروی انتقالی با زیاد شدن

۳. نتایج و بحث

بررسی ریزساختار

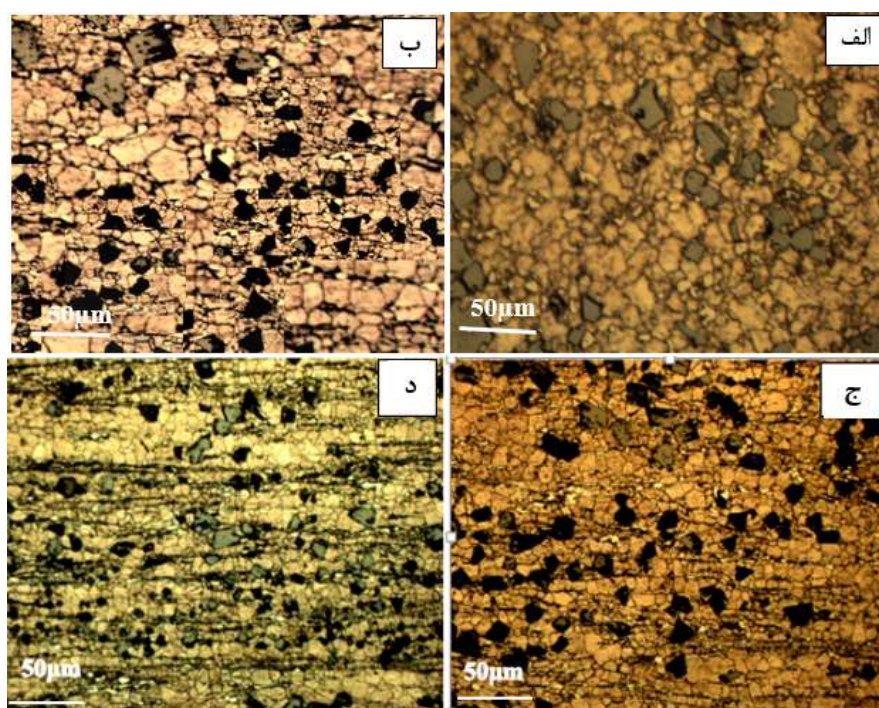
شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ نوری دو نانوکامپوزیت هیبریدی اکستروژ شده حاوی ۱ و ۲ درصد SiC نانومتری (AZ91/Mg₂Si/5%(SiC)_M/1%(SiC)_N) و (AZ91/Mg₂Si/5%(SiC)_M/2%(SiC)_N) را در کنار کامپوزیت‌های AZ91/Mg₂Si و SiC میکرومتری به رنگ سیاه و رسوبات Mg₂Si به رنگ خاکستری مشاهده می‌شوند. بعد از فرآیند اکستروژن داغ و در اثر تبلور مجدد دانه‌های هم‌محور تشکیل شده‌اند. با توجه به حضور ذرات SiC در اندازه‌های میکرو و نانومتری در کنار فاز Mg₂Si در مقایسه با ریزساختار کامپوزیت‌های AZ91/Mg₂Si و (AZ91/Mg₂Si/5%(SiC)_M/2%(SiC)_N) اندازه دانه‌ها ریزتر شده‌اند، بطوریکه متوسط اندازه دانه برای کامپوزیت‌های الف تا د بترتیب حدود ۱۰، ۸، ۵ و ۳ میکرومتر می‌باشد. همچنین با افزودن ذرات نانو، اندازه فاز Mg₂Si کاهش یافته است.

برای اطمینان از حضور و توزیع ذرات نانومتری، ریزساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شدند. در شکل ۲ تصاویر FESEM نانوکامپوزیت (AZ91/Mg₂Si/5%(SiC)_M/2%(SiC)_N) اکستروژ شده در بزرگنمایی‌های ۱۵۰۰، ۵۰۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۵۰۰۰۰ نشان داده شده‌اند. با توجه به آنالیز EDS ذرات و فازهای موجود که در جدول ۱ مشاهده می‌شوند، فاز Mg₁₇Al₁₂ در اطراف ذرات SiC میکرومتری و Mg₂Si در جهت اکستروژن کشیده شده‌اند. همچنین اندازه ذرات و آنالیز EDS بیانگر این است که ذرات SiC نانومتری هم در زمینه و هم در داخل فاز Mg₁₇Al₁₂ توزیع شده‌اند. البته به دلیل ریز بودن ذرات نانو در آنالیز EDS و عبور پرتو از ذرات و یا بزرگتر بودن محل اثر پرتو نسبت به سطح ذرات، به جز Si عناصر دیگر نظیر Mg و Al هم شناسایی شدند. حتی به

و قطر داخلی ۳۵ میلیمتر ریخته‌گری شدند، یک نمونه از هر کدام از کامپوزیت‌ها در دمای ۳۸۰ °C به مدت ۱۵ ساعت همگن سازی شده و سپس در دمای ۳۵۰ °C توسط یک قالب اکستروژن با قطر خروجی ۹ میلیمتر و با نسبت ۱۲ به ۱ اکستروژ شدند.

آماده سازی نمونه‌ها جهت بررسی ریزساختاری در هر دو حالت ریختگی و اکستروژ شده شامل سنباده‌زنی با شماره‌های مختلف، پولیش کاری با استفاده از خمیر الماس یک میکرومتری و اچ توسط محلول حاوی یک میلی لیتر HNO₃، ۷۵ میلی لیتر اتیلن گلیکول و ۲۴ میلی لیتر آب انجام شد. بررسی ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN کشور جمهوری چک جهت آنالیز و شناسایی بیشتر فازها و توزیع ذرات صورت گرفت. آزمون سختی‌سنجی از نوع ویکرز با استفاده از نیروی ۱۰ کیلوگرم انجام شد. حداقل سه نمونه از هر یک از کامپوزیت‌های ریختگی و اکستروژ شده با قطر ۸ و ارتفاع ۱۲ میلیمتر جهت آزمون فشار با کمک ماشین وایرکات ساخته شدند. دستگاه آزمون فشار مدل Z050 ساخت شرکت ZWICK آلمان است که سرعت دستگاه مطابق با استاندارد ASTM E9 یک میلیمتر بر دقیقه تنظیم شد و جهت کاهش اصطکاک فک‌ها از تفلون استفاده شد.

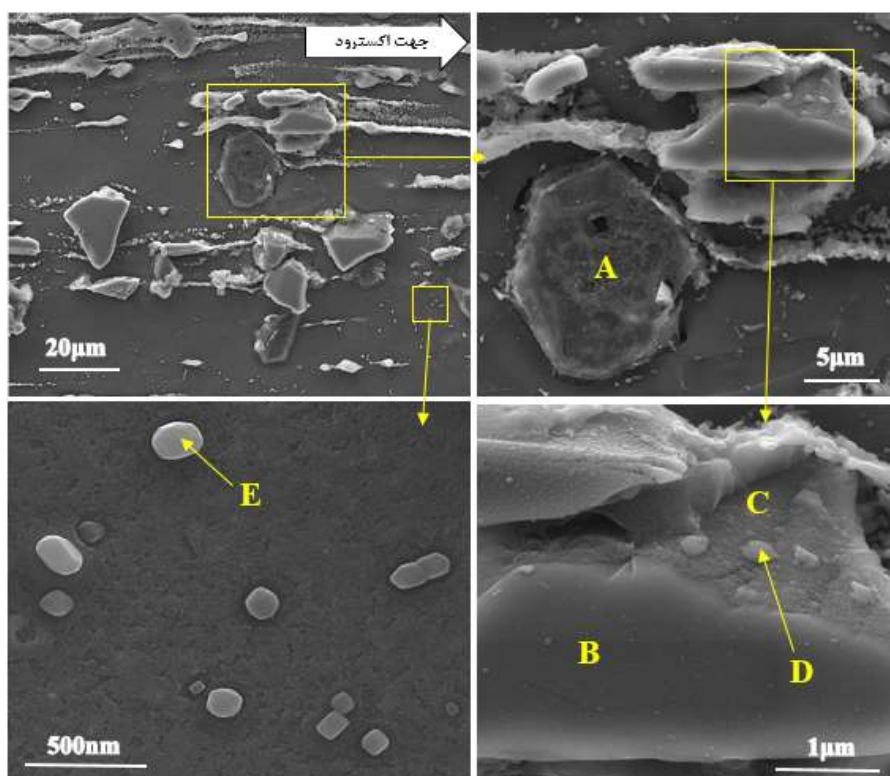
برای آزمون سایش نمونه‌های مفتولی با قطر ۵ و طول ۱۵ میلی متر تهیه شد. بعد از پولیش نهایی با کاغذ سنباده سلیکون کارباید ۱۰۰۰، آزمون‌ها در حالت پین روی صفحه فولادی از جنس فولاد AISI ۵۲۱۰۰ با سختی حدود ۸۰۰ ویکرز مطابق با استاندارد ASTM: G-۹۹ انجام شدند. در این آزمون دو نیروی سایش ۱۰ و ۴۰ نیوتن، سرعت ثابت ۵/۰ m/s و مسافت ۱۰۰۰ متر انتخاب گردیدند. دستگاه تست سایش به صورت پیوسته ضریب اصطکاک را ثبت می‌کرد. جهت تعیین میزان کاهش وزن و نرخ سایش در مدت آزمون، نمونه‌ها قبل و بعد از آزمون وزن شدند.



شکل ۱: تصاویر میکروسکوپ نوری نانوکامپوزیت هیبریدی اکستروژ شده
الف- AZ91/Mg₂Si/5%(SiC)_M ، ب- AZ91/Mg₂Si/5%(SiC)_M/1%(SiC)_N
ج- AZ91/Mg₂Si/5%(SiC)_M/2%(SiC)_N و د- AZ91/Mg₂Si/5%(SiC)_M/2%(SiC)_N

پلاستیک، ناحیه تغییر شکل ذره (PDZ) در مجاورت ذرات میکرومتری SiC تشکیل شده و به دلیل دانسیته نابجایی بالا، به تبلور مجدد در فصل مشترک ذرات SiC و زمینه کمک کرده و از طرف دیگر ذرات نانومتری SiC، در حین فرآیند اکستروژن از طریق پین کردن مرز دانه ها، باعث تاخیر یا ممانعت رشد دانه های زمینه شده اند و اثر پین کردن ذرات نانومتری در اطراف دانه ها قویتر از داخل دانه ها است [۱۸ و ۱۹]. همچنین، ذرات نانومتری می توانند فصل مشترک های با انرژی بالا ایجاد کنند که مستعد جوانه زنی دانه های جدید هستند. لذا ذرات نانومتری باعث افزایش دانسیته نابجایی و تقویت جوانه زنی دانه های تبلور مجدد می گردند [۲۰].

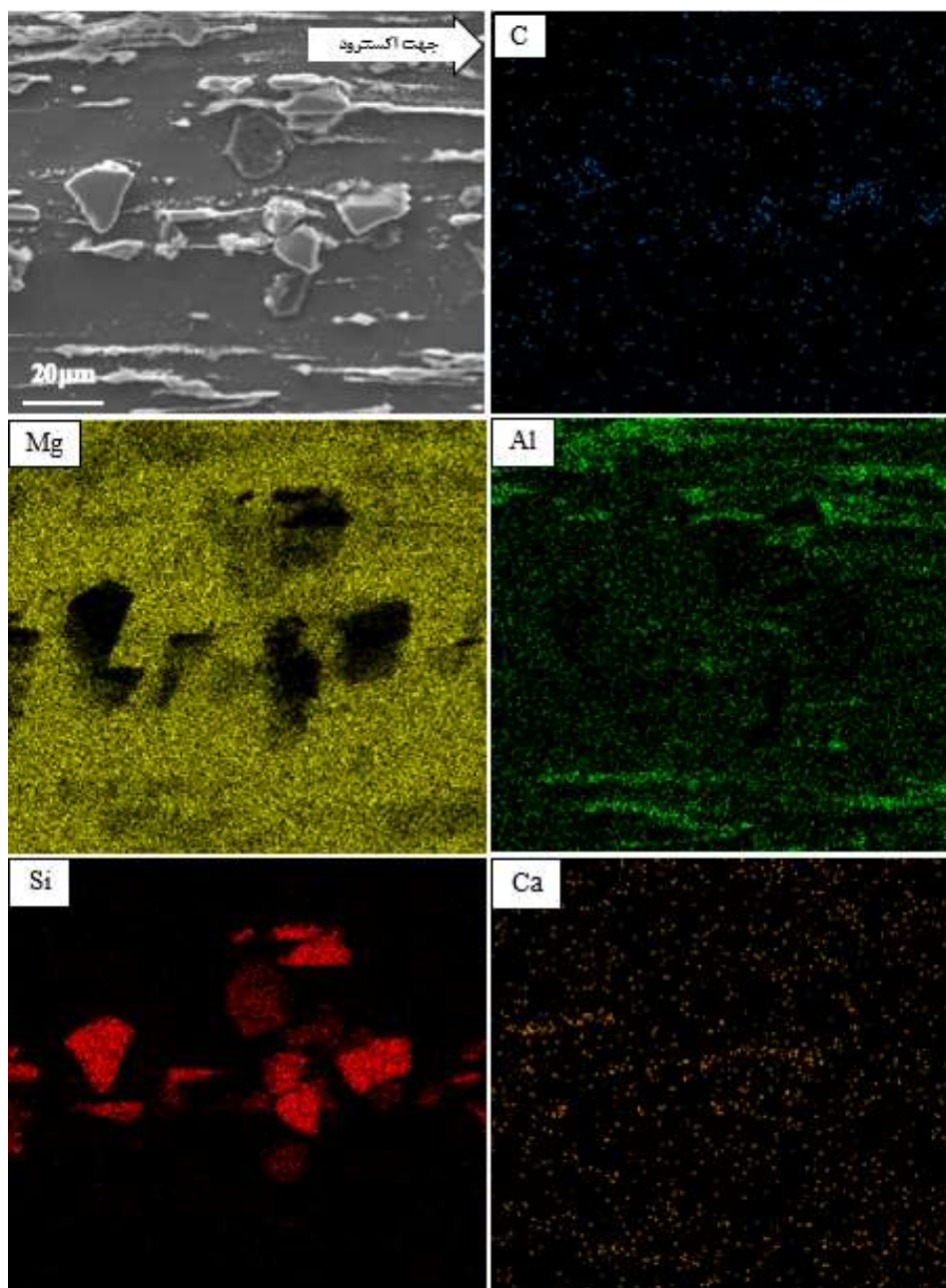
دلیل اکسید شدن جزئی سطح ذرات در فرآیندهای قبلی نظیر پیش گرم و آسیاب سیاره ای اکسیژن هم اضافه شده است. بررسی ها نشان دادند که بیشتر این ذرات به صورت همگن و یکنواخت توزیع شده اند. با توجه به مطالعات انجام شده [۱۷]، بزرگترین مشکل ساخت نانوکامپوزیت ها با روش ریخته گری گردابی توزیع نامناسب و آگلومره شدن ذرات است. در این پژوهش با وارد نمودن ذرات SiC نانومتری در داخل ذرات آلومینیم خالص توسط آسیاب سیاره ای، مشکل چسبیدن ذرات نانو به هم و آگلومره شدن آنها تا حد زیادی رفع شده است. بنظر می رسد در کامپوزیت های هیبریدی شامل ذرات SiC میکرو و نانومتری، به دو دلیل اندازه دانه ها ریزتر می شوند؛ از یک طرف در حین فرآیند تغییر شکل



شکل ۲: تصویر FESEM نانوکامپوزیت AZ91/Mg2Si/5%(SiC)/M/2%(SiC)N اکستروژن شده.

جدول ۱: نتایج آنالیز EDS نقاط مشخص شده در شکل ۲

درصد اتمی (%)							
نقطه	Mg	Al	Ca	Si	C	O	فاز
A	۶۰/۹۲	-	-	۳۹/۰۸	-		Mg ₂ Si
B	-	-	-	۵۷/۸۶	۴۲/۱۴		Micro SiC
C	۵۹/۸۸	۴۰/۱۲	-	-	-		Mg ₁₇ Al ₁₂
D	۱۷/۴۷	۳/۲۳	۶/۸۴	۳۳/۱۲	۲۵/۸۳	۱۰/۵۱	Nano SiC
E	۲۶/۶۹	۶/۶۵	۷/۸۱	۲۹/۱۷	۲۳/۴۳	۶/۲۵	Nano SiC



شکل ۳: آنالیز نقشه‌ای FESEM کامپوزیت $AZ91/Mg_2Si/5\%(SiC)_M/2\%(SiC)_N$

توسط ذرات نانو متوقف شدند. بنابراین، ذرات SiC نانومتری می‌توانند مورفولوژی، اندازه و توزیع رسوبات $Mg_{17}Al_{12}$ را تغییر دهند [۲۳]. ذرات نانو نه تنها باعث ریزدانه شدن زمینه $\alpha-Mg$ می‌شوند، بلکه باعث ریزتر شدن رسوبات $Mg_{17}Al_{12}$ و توزیع بیشتر آنها می‌شوند [۲۴]. علاوه بر ذرات نانو، رسوبات $Mg_{17}Al_{12}$ هم که در مرزدانه‌ها به صورت دینامیکی رسوب کردند، به عنوان مانع در برابر رشد دانه‌ها عمل کرده و باعث ریزشدن دانه‌ها می‌گردند [۲۵].

بررسی خواص مکانیکی

سختی‌سنجی

پارامتر سختی معیار مناسبی جهت ارزیابی خواص مکانیکی مواد مختلف است. شکل ۴ میانگین سختی نانوکامپوزیت‌های $AZ91/Mg_2Si/5\%(SiC)_M$

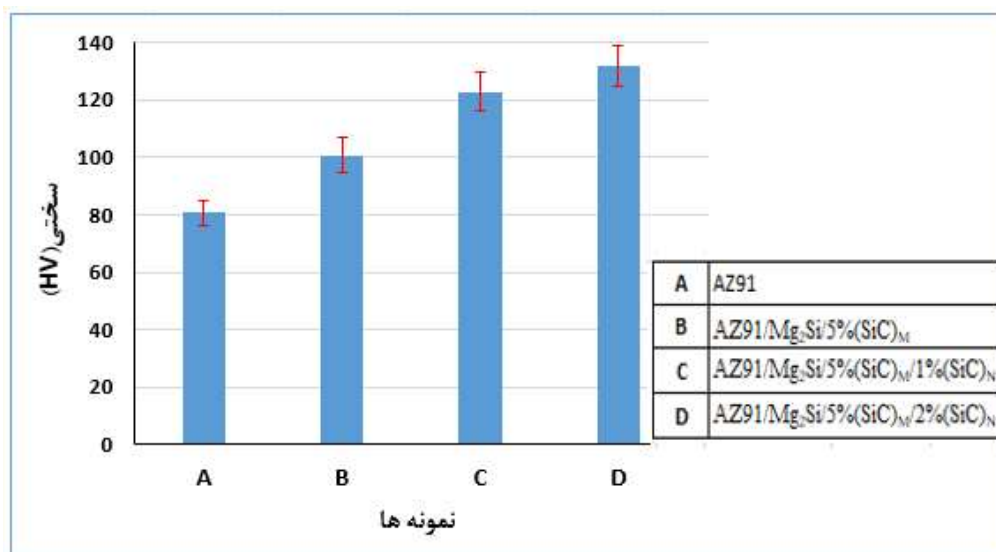
شکل ۳ آنالیز نقشه‌ای FESEM کامپوزیت $AZ91/Mg_2Si/5\%(SiC)_M/2\%(SiC)_N$ را نشان می‌دهد. با توجه به این تصاویر عنصر آلومینیم به صورت رسوبات $Mg_{17}Al_{12}$ در داخل دانه‌ها و بین دانه‌های تبلور مجدد در جهت اکستروژن کشیده شده‌اند. این فاز بیشتر در اطراف ذرات SiC و Mg_2Si تمرکز دارد. در مطالعات قبلی نیز مشاهده شد که در حالتی که میزان Al داخل زمینه منیزیم از ۱ درصد تجاوز کند، به شکل ترکیبات بین فلزی $Mg_{17}Al_{12}$ نمایان می‌شود [۲۱]. این ترکیب به صورت شبکه ناپیوسته در همه کامپوزیت‌هایی که آلیاژ پایه دارای آلومینیم هستند، تشکیل می‌شود [۲۲]. بطور کلی، در اثر فرآیند اکستروژن فازهای $Mg_{17}Al_{12}$ در جهت اکستروژن کشیده شده و لذا احتمال رسوب این فاز به صورت کروی کم خواهد بود. بعلاوه، زمانی که رسوبات پیوسته در اطراف ذرات SiC نانومتری به صورت طولی رشد کردند، رشد آنها

حاوی ۱ و ۲ درصد SiC نانومتری را به همراه سختی کامپوزیت فاقد ذرات نانو و همچنین آلیاژ پایه در شرایط اکستروژنه شده، مقایسه کرده است. با توجه به نمودار میانگین سختی کامپوزیت‌های حاوی ۱ و ۲ درصد ذرات نانو بترتیب حدود ۲۳ و ۳۰ درصد بیشتر از میانگین سختی کامپوزیت فاقد ذرات نانو و حدود ۵۲ و ۶۲ درصد بیشتر از متوسط سختی آلیاژ پایه AZ91 بوده است. ذرات SiC دارای سختی زیادی هستند و مقاومت ماده به تغییر شکل پلاستیک را افزایش می‌دهند که منجر به افزایش سختی کامپوزیت می‌شود. با افزایش این ذرات، مقاومت به تغییر شکل هم بیشتر شده و سختی بیشتری را منجر می‌شود. همچنین، با افزایش این ذرات اندازه دانه کاهش می‌یابد که از عوامل تأثیر گذار بر عدد سختی است [۲۵]. افزایش سختی در اثر ذرات نانو را می‌توان با دلایل دیگری نیز توجیه کرد [۲۶] که عبارتند از: الف- حضور ذرات سرامیکی سخت‌تر، به عنوان تقویت کننده از تغییر شکل زمینه جلوگیری می‌کنند، ب- افزایش دانسیته نابجایی در زمینه فلزی به دلیل عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی و مدول الاستیسیته بین زمینه و فاز تقویت کننده و ج- کاهش اندازه دانه که در بخش ریزساختار به آن اشاره شد.

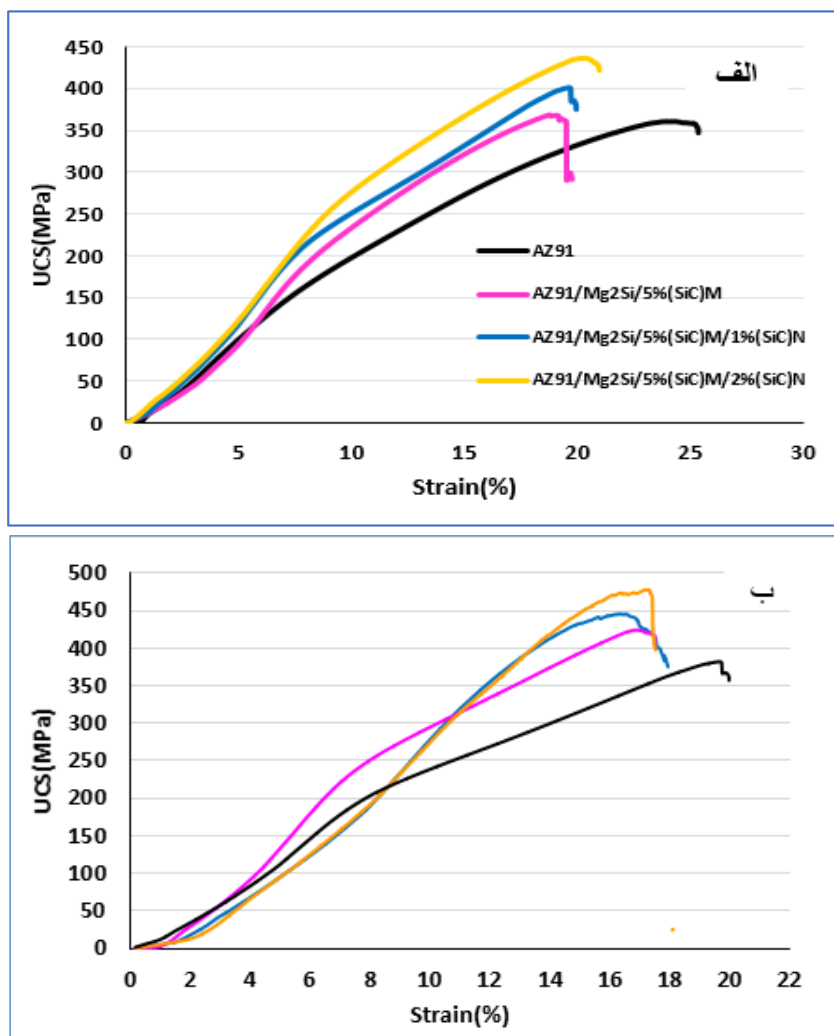
استحکام فشاری

محققان ثابت کرده‌اند که خواص مکانیکی کامپوزیت‌های منیزیمی تقویت شده با ذرات نانومتری SiC در مقایسه با کامپوزیت‌هایی که با ذرات میکرونی تقویت شده‌اند، بهبود بیشتری داشته‌اند [۲۷]. از طرف دیگر با انجام فرآیند اکستروژن، کرنش زیادی به آلیاژ اعمال می‌شود که افزایش چگالی نابجایی را به همراه دارد. نابجایی‌های ایجاد شده با یکدیگر برهمکنش داشته و حرکت آن‌ها سخت‌تر می‌شود. این کرنش اعمالی به کامپوزیت، شرایط برای تبلور مجدد و تشکیل دانه‌های جدید را فراهم می‌کند که این موضوع نیز طبق رابطه هال-پچ، افزایش استحکام را به همراه دارد. همچنین در مطالعات مختلفی گزارش شده است که اعمال فرایندهای شکل‌دهی، پیوند بین ذرات تقویت کننده و زمینه را تقویت می‌بخشد. وجود پیوند محکم مکانیکی میان ذره و زمینه در افزایش استحکام کامپوزیت بسیار مؤثر است، چراکه میزان انتقال بار از

زمینه به ذرات را افزایش می‌دهد [۲۸]. در شکل ۵ منحنی استحکام فشاری نانوکامپوزیت‌های هیبریدی AZ91/Mg₂Si/5%(SiC)_M حاوی ۱ و ۲ درصد SiC نانومتری به همراه کامپوزیت فاقد ذرات نانو و همچنین آلیاژ پایه، هم در حالت ریختگی و هم در حالت اکستروژنه شده مقایسه شده‌اند. با توجه به نمودارهای شکل ۵-الف با افزودن مقدار ۱ و ۲ درصد ذرات نانو SiC، میزان استحکام فشاری در حالت ریختگی نسبت به کامپوزیت متناظر فاقد ذرات نانو و همچنین آلیاژ پایه بهبود قابل ملاحظه‌ای داشته و از طرف دیگر، انعطاف‌پذیری کامپوزیت‌های حاوی ذرات نانو نسبت به کامپوزیت متناظر فاقد ذرات نانو نسبتاً بیشتر شده است. با انجام فرآیند اکستروژن، استحکام فشاری نانوکامپوزیت‌های حدود ۵۰ مگاپاسکال افزایش داشتند و همانند حالت ریختگی، در حالت اکستروژنه شده (شکل ۵-ب) هم میزان استحکام فشاری نانوکامپوزیت‌های نسبت به کامپوزیت متناظر فاقد ذرات نانو و همچنین آلیاژ پایه افزایش چشمگیری داشته و افزایش انعطاف‌پذیری در مقایسه با افزایش استحکام نسبتاً کم و جزئی بوده است. با مقایسه این نتایج با نتایج مقاله قبلی این نویسندگان [۱۶]، در حالت افزایش صرفاً ذرات میکرومتری، همراه با افزایش استحکام، انعطاف‌پذیری حدود ۳۰٪ کاهش یافته بود، ولی با افزایش ذرات نانو همراه با مقدار کم ذرات میکرومتری، نه تنها کاهش انعطاف‌پذیری رخ نداده است، بلکه افزایش نسبتاً جزئی در حدود ۵٪ در حالت ریختگی نسبت به کامپوزیت متناظر فاقد نانو هم مشاهده شد. ذرات نانو و فازهای رسوبی، از حرکت نابجایی‌ها جلوگیری کرده و در اثر استحکام‌دهی اوروان، باعث افزایش استحکام کامپوزیت‌ها شده‌اند [۲۹]. در پدیده استحکام‌دهی اوروان، در حین برخورد نابجایی‌ها به ذرات نانو، نابجایی‌ها قبل از حرکت پیوسته در مسیر خود، دور این موانع به صورت حلقه‌ای حرکت می‌کنند. اصطلاحاً به این حلقه، حلقه اوروان گفته می‌شود. اثر استحکام‌دهی اوروان در نانوکامپوزیت‌ها نقش زیادی داشته و در کامپوزیت‌های حاوی ذرات میکرومتری به دلیل فاصله زیاد ذرات این تأثیر نسبت به ذرات نانو کمتر است [۳۰]. در عملیات اکستروژن داغ فلز ریخته‌گری شده، ذرات نانو به عنوان موانع محدود کننده سخت در قبال رشد دانه‌ها از طریق محدود



شکل ۴: مقایسه میانگین سختی نانوکامپوزیت‌های AZ91/Mg₂Si/5%(SiC)_M حاوی ۱ و ۲ درصد SiC نانومتری با سختی کامپوزیت فاقد ذرات نانو و همچنین آلیاژ پایه در شرایط اکستروژنه شده.



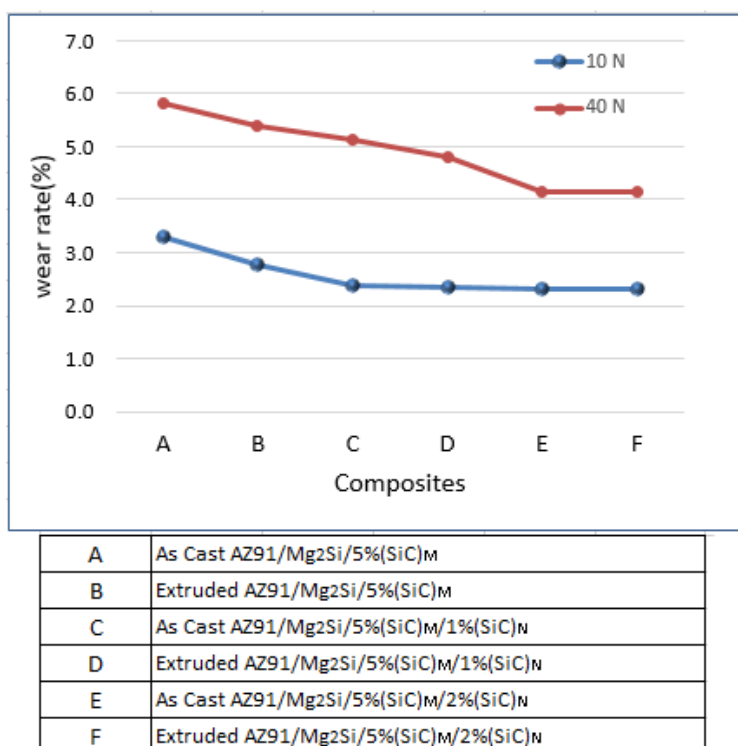
شکل ۵: منحنی های تنش-کرنش فشاری کامپوزیت های هیبریدی حاوی ۲ درصد SiC نانومتری به همراه کامپوزیت فاقد ذرات نانو و همچنین آلیاژ پایه، الف- در حالت ریختگی، ب- در حالت اکستروژنه شده.

مقاومت به سایش

رفتار سایش نانوکامپوزیت های هیبریدی $AZ91/Mg_2Si/5\%(SiC)_M$ حاوی ۱ و ۲ درصد ذرات نانو SiC بررسی شده و با کامپوزیت متناظر فاقد ذرات نانو مقایسه شدند. در شکل ۶ نرخ سایش سه نوع کامپوزیت در دو حالت ریختگی و اکستروژنه شده به تفکیک برای نیروهای سایش ۱۰ و ۴۰ نیوتن نشان داده شده اند. با توجه به این شکل، همانطور که انتظار می رفت با افزایش نیروی آزمایش سایش از ۱۰ به ۴۰ نیوتن، میزان سایش همه نمونه ها افزایش چشمگیری داشتند. همچنین با افزودن ذرات نانو نرخ سایش نمونه ها در هر دو نیرو کاهش داشته اند. در نیروی ۴۰ نیوتن، نرخ سایش کامپوزیت حاوی ۲ درصد ذرات نانو از کامپوزیت حاوی ۱ درصد ذرات نانو و نمونه های دیگر کمتر بوده، ولی در نیروی ۱۰ نیوتن، اختلاف زیادی بین دو نانوکامپوزیت دیده نمی شود. همچنین فرآیند اکستروژن تاثیر زیادی در کاهش میزان سایش نانوکامپوزیت ها در نیروی ۱۰ نیوتن نشان نداد. در شکل ۷ متوسط ضریب اصطکاک دو نانوکامپوزیت به همراه کامپوزیت متناظر فاقد ذرات نانو و آلیاژ پایه مقایسه شدند. با توجه به میزان سایش زیاد در نیروی ۴۰ نیوتن، ضریب اصطکاک هم تاثیر معکوس داشته و مقادیر آن در نمونه های مختلف،

کردن مهاجرت مرز دانه ها که در طی عملیات تبلور مجدد به صورت حرارتی تهییج شده اند، عمل می کنند. همچنین ذرات مانع تغییر شکل زمینه فلزی شده و باعث ایجاد تنش در فصل مشترک بین این دو فاز شده و این تنش های اطراف ذرات نانو، باعث تغییر شکل های پلاستیکی زمینه شده و دانسیته نابجایی را افزایش می دهد که در نتیجه استحکام و سختی نانوکامپوزیت ها افزایش می یابند [۳۰].

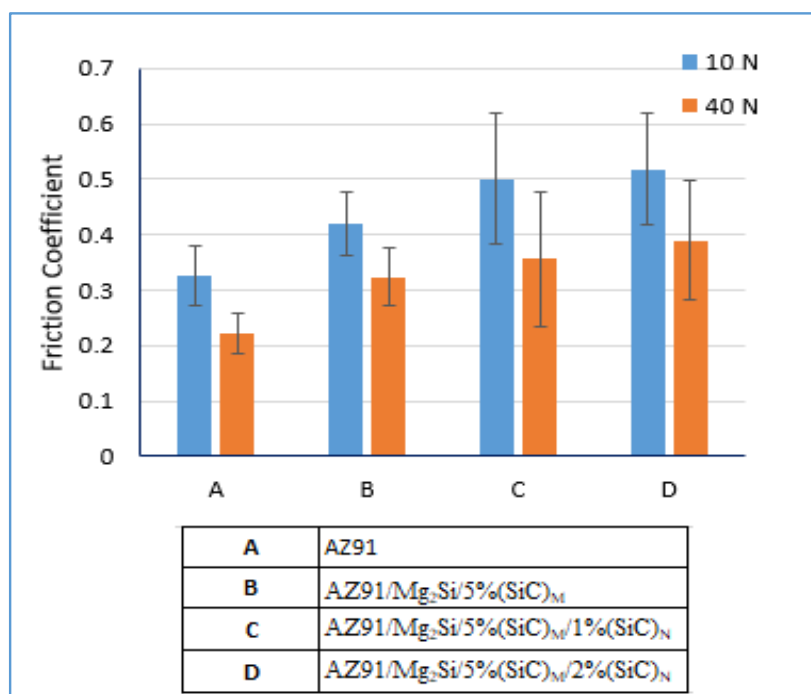
نکته ای بسیار قابل توجه در نانوکامپوزیت زمینه منیزیمی این است که بر خلاف نوع حاوی تقویت کننده های میکرومتری که با افزایش میزان SiC، استحکام افزایش و مقدار انعطاف پذیری کاهش می یابد، در تقویت کننده های نانومتری، میزان انعطاف پذیری با اضافه کردن SiC تقریباً ثابت می ماند. افزایش استحکام همراه با انعطاف پذیری خوب در نانوکامپوزیت ها، نتیجه ریزدانه شدن زمینه و تاثیر آن بر استحکام از طریق مکانیزم هال پیچ، استحکام بخشی پراکندگی و توزیع یکنواخت ذرات نانو در زمینه بوده است. در کامپوزیت های با ذرات میکرو به دلیل تشکیل حفرات و ترک های ریز در فصل مشترک ذرات و زمینه و رشد آنها در حین تغییر شکل پلاستیک، شکست ترد اتفاق افتاده و انعطاف پذیری کاهش می یابد [۳۱].



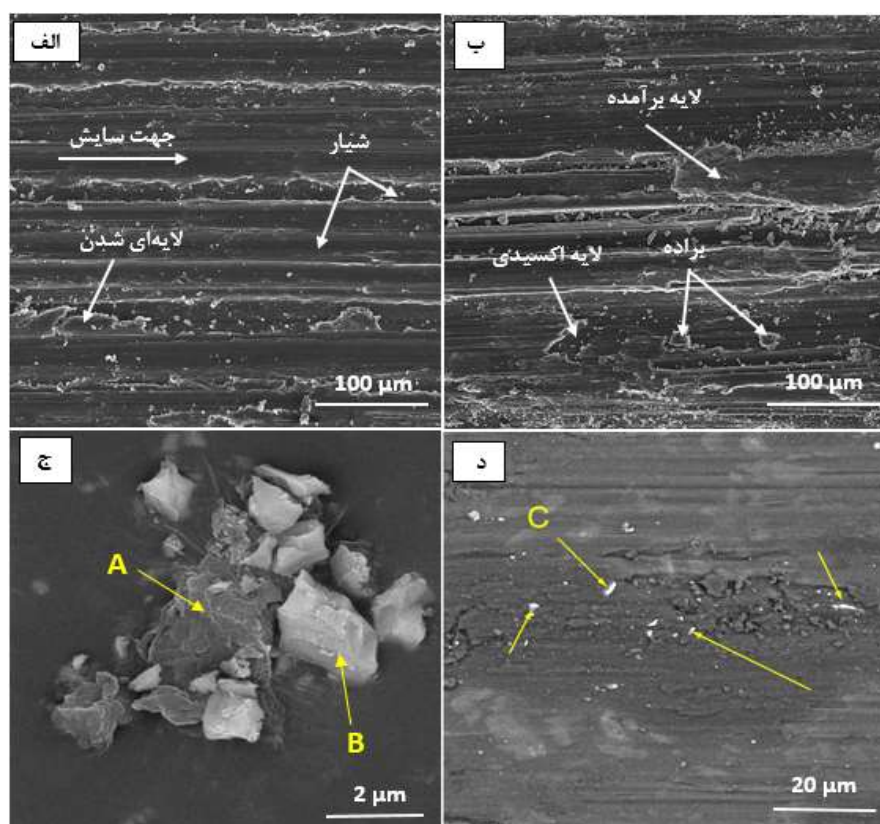
شکل ۶: مقایسه نرخ سایش نانوکامپوزیت های هیبریدی حاوی ۱ و ۲ درصد SiC نانومتری با کامپوزیت متناظر فاقد ذرات نانو در حالت های ریختگی و اکستروود شده به تفکیک برای نیروهای سایش ۱۰ و ۴۰ نیوتن.

به جدول ۲ رسوبات سفید رنگ نشان داده شده در تصویر ۸-د حاوی آهن هستند. پوسته های لایه ای و برآمده در اثر فشار در حین حرکت موضعی به سطح سایش جوش خورده است، این پدیده در تصویر ۸-ب نشان داده شده است. افزایش تغییر شکل پلاستیکی زمینه باعث تبدیل حالت برش به حالت شخم زنی سطح سایش شده و لذا در حین سایش، شیارهای عمیق یا کم عمق تشکیل شده اند. البته با افزایش ذرات نانوسیسیل، تغییر شکل پلاستیکی کاهش یافته و سایش از نوع چسبان هم کاهش می یابد [۳۳]. به دلیل حضور ذرات و اصطکاک زیاد بین سطح پین و صفحه فولادی، حرارت زیادی ایجاد شده و باعث تشکیل فیلم های اکسیدی و رشد آنها در سطح سایش شده است که پس از شکسته شدن به صورت براده از سطح جدا می شوند. لایه اکسیدی تنش برشی بالاتری داشته و این اثر مفید بوده و می تواند از سایش چسبان جلوگیری نماید [۳۴]. مطالعات دیگر، ثابت کردند که با توجه به حضور ۵ درصد ذرات SiC میکرومتری در این کامپوزیت ها، مکانیزم های سایش غالب، سایش از نوع رفتگی^۲ و اکسیداسیون بوده است. این ذرات پس از کنده شدن بین دو سطح گیر کرده و در اثر حرکت نسبی، به دلیل سختی خیلی بالا، باعث ایجاد خراش و شیار در سطح کامپوزیت و حتی ساییده شدن سطح صفحه فولادی شده اند [۳۵]. این موارد در تصاویر شکل ۸ مشاهده شده اند. در کنار تأثیر ذرات نانو در کاهش اندازه دانه، افزایش سختی و استحکام، بیشترین اثر ذرات نانو در افزایش مقاومت به سایش، فصل مشترک مستحکم ذرات نانو با زمینه بوده است، در حالی که ذرات با اندازه میکرومتری راحت تر از ذرات نانو از سطح کنده می شوند [۳۶].

کمتر از نیروی ۱۰ نیوتن هستند. نمودارها نشان می دهند که در هر دو نیروی سایش، با افزایش ذرات نانو، ضریب اصطکاک افزایش یافته است. با مقایسه این نتایج با نتایج مقاله قبلی این نویسندگان برای کامپوزیت های فاقد ذرات نانو [۱۶]، می توان به این نتیجه رسید که تأثیر استفاده همزمان از ذرات SiC با اندازه های میکرو و نانو در بهبود مقاومت به سایش کامپوزیت های اکستروود شده، مخصوصاً در نیروهای سایش بیشتر، بهتر از کامپوزیت های حاوی ذرات میکرو SiC با مقادیر بیشتر است. دلیل آن آگلومره شدن ذرات میکرو، برخورد آنها به یکدیگر در حین فرآیند اکستروژن و شکستن و خرد شدن آنها و در نتیجه کنده شدن راحت و سریع ذرات از سطح سایش، در زمان آزمایش سایش است. در حالی که، ذرات نانوسیسیل مشکلات فوق را نداشته و چسبندگی مناسب با زمینه دارند و با توزیع مناسب در برابر نفوذ و برش ماده ساینده، مقاومت می کنند [۳۲]. افزودن ذرات نانو در کسر حجمی کم یک انتخاب جذاب برای کاهش سایش در اثر لایه لایه شدن است که معمولاً در کامپوزیت های تقویت شده با ذرات میکرو مشاهده شده است [۲۹]. ذرات با اندازه میکرومتری در مقایسه با ذرات نانو ممکن است حفرات بزرگتری ایجاد کنند. در نتیجه در اثر سایش امکان کنده شده ذرات میکرو نسبت به ذرات نانو بیشتر است. بطور کلی، نانوکامپوزیت های هیبریدی رفتار سایشی بهتری از خود نشان می دهند [۲۹]. شکل ۸ تصاویر FESEM سطح سایش نانوکامپوزیت های هیبریدی را نشان می دهد. سطوح سایش حاوی شیارهای عمیق، برآمدگی و لایه لایه شدگی هستند. آنالیز EDS نشان داده است که براده ها حاوی اکسید منیزیم هستند. همچنین با توجه



شکل ۷: ضریب اصطکاک نانوکامپوزیت‌های هیبریدی حاوی ۱ و ۲ درصد SiC نانومتری به همراه آلیاژ پایه و کامپوزیت فاقد ذرات نانو در حالت اکستروژن شده برای نیروهای سایش ۱۰ و ۴۰ نیوتن.



شکل ۸: تصاویر FESEM سطح سایش نانوکامپوزیت‌های هیبریدی الف - حاوی ۱٪ SiC نانومتری، ب - ۲٪ SiC نانومتری ج - براده‌های اکسیدی د - رسوبات حاوی آهن و اکسید.

جدول ۲: نتایج آنالیز EDS نقاط مشخص شده در شکل ۸

درصد اتمی (%)						
نقطه	Mg	Al	O	C	Fe	Si
A	۳۵/۳۳	۳/۲۴	۲۴/۱۲	۱۲/۴۹	۱۵/۳۸	۷/۵۳
B	۷۱/۲۶	۷/۰۴	۱۳/۸۷	۴/۴۵	-	۳/۸۳
C	۱۲/۸۱	۲/۰۷	۲۵/۱۱	-	۵۹/۲۸	-

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر همزمان ذرات میکرو SiC و نانو SiC بر ریزساختار، خواص مکانیکی و مقاومت به سایش کامپوزیت AZ91/Mg₂Si بررسی شده و نتایج بدست‌آمده از این تحقیق به شرح زیر است: استفاده همزمان از مقادیر کمتر ذرات میکرومتری و نانومتری، گزینه مناسبی جهت افزایش خواص مکانیکی و مقاومت به سایش است. سختی کامپوزیت‌های حاوی ۱ و ۲ درصد SiC نانومتری به ترتیب حدود ۲۳ و ۳۰ درصد بیشتر از متوسط سختی کامپوزیت متناظر فاقد ذرات نانو و حدود ۵۲ و ۶۲ درصد بیشتر از متوسط سختی آلیاژ زمینه AZ91 بوده است.

در دو حالت ریختگی و اکستروژن شده، استحکام فشاری کامپوزیت حاوی ۲٪ ذرات SiC نانومتری نسبت به کامپوزیت حاوی ۱٪ ذرات SiC نانومتری حدود ۸ الی ۱۰٪ و نسبت به کامپوزیت متناظر فاقد ذرات نانو حدود ۱۵ الی ۲۰٪ افزایش داشته است و از طرف دیگر، انعطاف‌پذیری کامپوزیت‌های حاوی ذرات نانو نسبت به کامپوزیت متناظر فاقد ذرات نانو، افزایش جزیی در حدود ۵٪ داشته است. استفاده همزمان از ذرات SiC با اندازه‌های میکرومتری و نانومتری، مقاومت به سایش کامپوزیت‌ها را در دو حالت ریختگی و اکستروژن شده، افزایش داد.

References

[1] Lotfipour M, Emamy M, Allameh SH, Pournabari B. Effect of Hot extrusion on microstructure and tensile properties of Ca modified Mg-Mg₂Si composite. *Procedia Materials Science*. 2015 Jan 1;11:38-43.

[2] Liu Q, Wang F, Wu W, An D, He Z, Xue Y, Zhang Q, Xie Z. Enhanced mechanical properties of SiC/Al composites at cryogenic temperatures. *Ceramics International*. 2019 Feb 15;45(3):4099-102.

[3] Chawla KK. *Metal Matrix Composites*, Composite Materials. i springers, New York, NY. 2012.

[4] Kumar S, Suman KN, Ravindra K, Poddar P, SB VS. Microstructure, mechanical response and fractography of AZ91E/Al₂O₃ (p) nano composite fabricated by semi solid stir casting method. *Journal of magnesium and alloys*. 2017 Mar 1;5(1):48-55.

[5] Pirlari AJ, Emamy M, Amadeh AA, Naghizadeh M. Elucidating the effect of TiB₂ volume percentage on the mechanical properties and corrosion behavior of Al5083-TiB₂ composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2019 Nov;28:6912-20.

[6] Aravindan S, Rao PV, Ponappa K. Evaluation of physical and mechanical properties of AZ91D/SiC composites by two step stir casting process. *Journal of Magnesium and alloys*. 2015 Mar 1;3(1):52-62.

[7] Meher A, Mahapatra MM, Samal P, Vundavilli PR, Madavan SP. Synthesis, microstructure and mechanical properties of magnesium matrix composites fabricated by stir casting. *Materials Today: Proceedings*. 2019 Jan 1;18:4034-41.

[8] Viswanath A, Dieringa H, Kumar KA, Pillai UT, Pai BC. Investigation on mechanical properties and creep behavior of stir cast AZ91-SiCp composites. *Journal of Magnesium and alloys*. 2015 Mar 1;3(1):16-22.

[9] Nie KB, Wang XJ, Xu L, Wu K, Hu XS, Zheng MY. Effect of hot extrusion on microstructures and mechanical properties of SiC nanoparticles reinforced magnesium matrix composite. *Journal of Alloys and Compounds*. 2012 Jan 25;512(1):355-60.

[10] Chang H, Hu X, Wang X, Du J, Tong L. Aging behavior of the extruded SiCp-reinforced AZ91 Mg alloy composite. *Journal of Materials Research*. 2019 Jan;34(2):335-43.

[11] WANG XJ, HU XS, NIE KB, KUN WU, ZHENG MY. Hot extrusion of SiCp/AZ91 Mg matrix composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2012 Aug 1;22(8):1912-7.

[12] Aravindan S, Rao PV, Ponappa K. Evaluation of physical and mechanical properties of AZ91D/SiC composites by two step stir casting process. *Journal of Magnesium and alloys*. 2015 Mar 1;3(1):52-62.

[13] Turan ME, Zengin H, Cevik E, Sun Y, Turen Y, Ahlatci H. Wear behaviors of B₄C and SiC particle reinforced AZ91 magnesium matrix metal composites. *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*. 2016 Aug 3;10(9):1224-7.

[14] Girish BM, Satish BM, Sarapure S, Somashekar DR, Basawaraj. Wear behavior of magnesium alloy AZ91 hybrid composite materials. *Tribology Transactions*. 2015 May 4;58(3):481-9.

[15] Moussa ME, Waly MA, El-Sheikh AM. Effect of Ca addition on modification of primary Mg₂Si, hardness and wear behavior in Mg-Si hypereutectic alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2014 Sep 1;2(3):230-8.

[16] Zarghami M, Emamy M, Malekan M. Microstructure, mechanical properties and wear behaviour of the AZ91-Mg₂Si-SiC hybrid composites. *Materials Science and Technology*. 2021 Nov 2;37(16):1333-41.

[17] Shen MJ, Wang XJ, Ying T, Wu K, Song WJ. Characteristics and mechanical properties of magnesium matrix composites reinforced with micron/submicron/nano SiC particles. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016 Nov 25;686:831-40.

[18] Nie KB, Wang XJ, Xu FJ, Wu K, Zheng MY. Microstructure and tensile properties of SiC nanoparticles reinforced magnesium matrix composite prepared by multidirectional forging under decreasing temperature conditions. *Materials Science and Engineering: A*. 2015 Jul 15;639:465-73.

[19] Niu X, Li G, Zhang Z, Zhou P, Wang H, Zhang S, Cheng W. Simultaneously improving the strength and ductility of extruded bimodal size SiCp/AZ61 composites: Synergistic effect of micron/nano SiCp and submicron Mg₁₇Al₁₂ precipitates. *Materials Science and Engineering: A*. 2019 Jan 16;743:207-16.

[20] Nie KB, Wang XJ, Deng KK, Hu XS, Wu K. Magnesium matrix composite reinforced by nanoparticles—a review. *Journal of magnesium and alloys*. 2021 Jan 15;9(1):57-77.

[21] Sunil BR, Ganesh KV, Pavan P, Vadapalli G, Swarnalatha C, Swapna P, Bindukumar P, Reddy GP. Effect of aluminum content on machining characteristics of AZ31 and AZ91 magnesium alloys during drilling. *Journal of Magnesium and alloys*. 2016 Mar 1;4(1):15-21.

[22] Subramani M, Huang SJ, Borodianskiy K. Effect of SiC nanoparticles on AZ31 magnesium alloy. *Materials*. 2022 Jan 28;15(3):1004.

- [23] Zhang C, Li Z, Ye Y, Yuan Y, Fang D, Wu H, Li W. Interaction of nanoparticles and dislocations with Mg₁₇Al₁₂ precipitates in n-SiCp/AZ91D magnesium matrix nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020 Jan 30;815:152416.
- [24] Zhang C, Li Z, Ye Y, Yuan Y, Fang D, Wu H, Li W. Interaction of nanoparticles and dislocations with Mg₁₇Al₁₂ precipitates in n-SiCp/AZ91D magnesium matrix nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020 Jan 30;815:152416.
- [25] James SJ, Venkatesan K, Kuppan P, Ramanujam R. Comparative study of composites reinforced with SiC and TiB₂. *procedia Engineering*. 2014 Jan 1;97:1012-7.
- [26] Gupta M, Wong WL. Magnesium-based nanocomposites: Lightweight materials of the future. *Materials Characterization*. 2015 Jul 1;105:30-46.
- [27] Shen MJ, Ying WF, Wang XJ, Zhang MF, Wu K. Development of high performance magnesium matrix nanocomposites using nano-SiC particulates as reinforcement. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2015 Oct;24:3798-807.
- [28] Mohanavel V, Rajan K, Arul S, Senthil PV. Production, Microstructure and Mechanical behavior of AA6351/TiB₂ composite synthesized by direct melt reaction method. *Materials Today: Proceedings*. 2017 Jan 1;4(2):3315-24.
- [29] Guo YC, Nie KB, Kang XK, Deng KK, Han JG, Zhu ZH. Achieving high-strength magnesium matrix nanocomposite through synergistical effect of external hybrid (SiC+ TiC) nanoparticles and dynamic precipitated phase. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019 Jan 15;771:847-56.
- [30] Salevati MA, Imam A, Seifi R, Akbaripناه F. Investigating the microstructure, hardness and tensile behavior of magnesium AZ80 alloy and AZ80/SiC nanocomposite manufactured through dual equal channel lateral extrusion (DE-CLE). *Metals and Materials International*. 2021 Sep;27:3538-49.
- [31] Shen MJ, Ying WF, Wang XJ, Zhang MF, Wu K. Development of high performance magnesium matrix nanocomposites using nano-SiC particulates as reinforcement. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2015 Oct;24:3798-807.
- [32] Alizadeh A, Khayami A, Karamouz M, Hajizamani M. Mechanical properties and wear behavior of Al5083 matrix composites reinforced with high amounts of SiC particles fabricated by combined stir casting and squeeze casting; A comparative study. *Ceramics International*. 2022 Jan 1;48(1):179-89.
- [33] Zhang L, Luo X, Liu J, Leng Y, An L. Dry sliding wear behavior of Mg-SiC nanocomposites with high volume fractions of reinforcement. *Materials Letters*. 2018 Oct 1;228:112-5.
- [34] Ahmadkhaniha D, Sohi MH, Salehi A, Tahavvori R. Formations of AZ91/Al₂O₃ nano-composite layer by friction stir processing. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2016 Dec 1;4(4):314-8.
- [35] Huang SJ, Jeng YR, Semenov VI, Dai YZ. Particle size effects of silicon carbide on wear behavior of SiC p-reinforced magnesium matrix composites. *Tribology Letters*. 2011 Apr;42:79-87.
- [36] Banerjee S, Sahoo P, Davim JP. Tribological characterisation of magnesium matrix nanocomposites: A review. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021 Apr;13(4):16878140211009025.