



The Effect of Copper Content on the Wear Resistance of MMC Composites (Fe-C-Cu-SiC)

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Beigi Kheradmand A.^{1*}
Khalili M.¹

How to cite this article

Beigi Kheradmand A , Khalili M, The Effect of Copper Content on the Wear Resistance of MMC Composites (Fe-C-Cu-SiC), Modares Mechanical Engineering; 2024;24(09):597-609.

¹ Shahrekord branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran.

*Correspondence

Address: Shahrekord branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran.

kheradmand@iaushk.ac.ir

Article History

Received: July 29, 2024
Accepted: November 24, 2024
ePublished: December 20, 2024

ABSTRACT

The aim of this study is to achieve an optimal chemical composition in the metal matrix composite (MMC) (Fe-C-Cu-SiC) to enhance the wear resistance of the composite and evaluate its mechanical properties based on the optimal amount of copper, making it suitable for use in brake pads for aircraft, locomotives, and racing cars. For this purpose, Fe, C, and BaSO₄ with a chemical composition of (6SiC-6.5C-6BaSO₄-Fe) and varying amounts of copper (3%, 7%, 11%, 15%, and 19%) were mechanically milled using powder metallurgy. The materials were then sintered in a furnace with protective gas and hot-pressed at 1000°C and 400 MPa, resulting in five test samples. Wear and friction coefficient tests were conducted under a load of 20 N, at 700 rpm, over a distance of 1000 m. Hardness tests, density measurements, microstructural examination with a scanning electron microscope (SEM), and EDAX analysis were also conducted to assess the wear mechanism. Examination of the worn surfaces indicated that during the initial sliding distance, the predominant mechanism was abrasion. As the sliding distance increased, abrasive and oxidation wear mechanisms, along with plastic deformation, became active. Test results showed that the Fe-15Cu-6.5C-6SiC-6BaSO₄ sample had higher wear resistance and a more suitable friction coefficient (within the acceptable range of 0.2 to 0.4) compared to the other four samples, suggesting its potential application for brake pads.

Keywords Metal Matrix Composite (MMC), Brake Pad, Copper, Wear Resistance, Powder Metallurgy

CITATION LINKS

1-P/M aluminum matrix composites... 2-Wear and contact conditions of brake... 3- Compositions, functions, and testing... 4- Microstructure and mechanical properties... 5- A high-performance copper-based brake... 6- Design of Fe-SiC-Cu-G Composite... 7-The effect of metal fibers on... 8- Surface characterisation of brake... 9- Tribological surfaces of organic brake... 10- The friction and wear of Cu-based... 11- Tribological study of gray cast iron... 12- Dry sliding wear of particulate-reinforced... 13- On friction layer formation in polymer... 14-A Comparison Between the Ablation... 15-Effect of porosity on microstructure... 16- Improvement of wearing property... 17-Investigation of factors affecting brake... 18- AR Friction Material (Metal Reinforcement... 19-Evaluation of properties for hybrid... 20- Effect of Cu addition on... 21- Braking behaviours of C/C-SiC mated... 22- Tribological behavior and mechanism... 23- Composites, science... 24-Experimental evaluation of the lubrication... 25- Embedding of ultra-dispersed... 26- Wear characteristics of hybrid aluminium... 27- Manufacturing Processes for... 28- Processing and properties of advanced... 29- The effect of alumina nanoparticles... 30-Study on mechanical and wear... 31- Effect of reinforcement type, size, and... 32- Mechanical properties of powder based... 33-Tensile and Fracture Properties... 34- The Effect of Alloying, Processing... 35-Brake pad specifications. 36- Cement-Based Materials. 37- Load, speed and temperature sensitivities... 38- Use of PM Fe-Cu-SiC... 39- Predictive model for minimum... 40- Nano-enhanced biolubricant... 41- Minimum quantity lubrication... 42- Cryogenic minimum quantity... 43-Tribological characterization... 44- Maximum undeformed equivalent... 45- Analysis of grinding ... 46- Investigation of the effect... 47- Study on wear... 48- Improving wear resistance... 49- Topographic properties of...

تأثیر مقدار مس بر مقاومت به سایش کامپوزیت MMC زمینه آهن Fe-C-Cu-SiC

اعظم بیگی خردمند^{۱*}، مریم خلیلی^۱

^۱ مرکز تحقیقات انرژی و محیط زیست، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، دستیابی به ترکیب شیمیایی بهینه در کامپوزیت زمینه فلزی (MMC) (Fe-C-Cu-SiC) برای افزایش مقاومت به سایش کامپوزیت و نیز ارزیابی خواص مکانیکی کامپوزیت بر اساس مقدار بهینه مس است به گونه‌ای که بتوان آن را در لنت ترمز هواپیما، لوکوموتیو و ماشین‌های مسابقه به کار برد. برای این منظور Fe، C، BaSO₄ با ترکیب شیمیایی (Fe-6SiC-6.5C-6BaSO₄) با مقادیر متفاوت مس (۳٪، ۷٪، ۱۱٪، ۱۵٪ و ۱۹٪) به روش متالورژی پودر آسیاب مکانیکی شده و سپس تحت عملیات تفجوشی در کوره با گاز محافظ و پرس گرم در دمای ۱۰۰۰ C و فشار ۴۰۰ MPa قرار گرفتند و ۵ نمونه آزمایشی ساخته شد. آزمون‌های سایش و ضریب اصطکاک تحت نیروی ۲۰ N و ۷۰۰ rpm در ۱۰۰۰ m انجام شد. همچنین آزمون‌های سختی سنجی، چگالی و بررسی ریزساختار با میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM و نیز آنالیز EDAX برای بررسی مکانیزم سایش انجام شد. بررسی سطوح ساییده نشان داد که در مسافت اولیه لغزش، مکانیسم غالب، سایش بوده و با افزایش مسافت لغزش مکانیسم‌های سایش خراشان و اکسیداسیون و تغییر شکل پلاستیک فعال شده است. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان داد نمونه BaSO₄-6SiC-6.5C-6Cu-15Fe مقاومت به سایش بالاتر و ضریب اصطکاک مناسب‌تری (در محدوده مجاز ۰/۲ تا ۰/۴) نسبت به چهار نمونه دیگر داشته است، بنابراین می‌توان آن را به‌عنوان کاربرد لنت ترمز معرفی کرد.

کلیدواژه‌ها: کامپوزیت زمینه فلزی (MMC)، متالورژی پودر، مس، لنت ترمز، مقاومت در برابر سایش.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۴

*نویسنده مسئول: kheradmand@iaushk.ac.ir

۱- مقدمه

کامپوزیت‌ها مواد مرکب با یک ساختار همگن هستند که هر جزء علاوه بر دارا بودن خواص خود می‌تواند کاستی‌های جزء دیگر را پوشش دهد. امروزه صنایع مختلف از جمله خودروسازی و هوافضا نیازمند استفاده از مواد سبک با خواص مکانیکی بالا هستند. این امر علاوه بر کاهش هزینه تولید باعث کاهش مصرف انرژی و سوخت نیز می‌شود [1, 2]. درجه حرارت بالا می‌تواند باعث جوش خوردن قطعات به یکدیگر شود که در نتیجه باعث عواقب فاجعه باری می‌شود که برای جلوگیری از این اثرات می‌توان از کامپوزیت استفاده کرد. مواد تشکیل‌دهنده کامپوزیت باید خصوصیات از جمله نرخ سایش بالا، عمر طولانی، مقاومت مکانیکی در دمای بالا، نقطه ذوب بالا، ویژگی ضد رطوبت با قطعات دیگر، گرمای ویژه بالا، هدایت حرارتی بالا، انبساط حرارتی پایین،

سازگاری و انطباق با عضوهای جفت شونده دیگر جهت جلوگیری از لرزش و سهولت تولید را دارا باشند [2].

تاکنون بیش از ۲۰۰۰ نوع ترکیب مختلف برای لنت ترمزها فرموله شده است [3]. کامپوزیت‌ها در صنایع هوافضا بخصوص در ساخت بدنه و ترمز هواپیما و نیز پوشش رادار استفاده می‌شوند [4]. کامپوزیت‌های زمینه فلزی MMC به مقیاس وسیعی در قطارها، وسایط نقلیه مهندسی، کشتی و ماشین‌آلات سنگین که به ترمزگیری سنگین و سرعت‌های بالا نیاز دارند استفاده می‌شوند [5, 6].

افزودنی‌های سایشی مورد استفاده در لنت ترمز شامل آهن، نیکل، منیزیم، مس، برنج و روی به شکل پودری یا براده هستند [7]. این ذرات باعث بهبود هدایت حرارتی، پایدار کردن خواص سایشی و هم‌چنین کنترل نرخ فرسایش لنت و دیسک می‌شوند [8, 9]. عملکرد قطعات تحت شرایط دمای بالا و سرعت زیاد تحت تأثیر اصطکاک قرار می‌گیرد. اصطکاک در سیستم‌های مختلفی که در آن‌ها کنترل سرعت بحرانی است، استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای بهبود عملکرد سایشی دیسک انجام گرفته و نتیجه آن توسعه دیسک‌های غیرآهنی نظیر آلیاژهای مس [10]، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم [2, 10, 11, 12, 13] کامپوزیت‌های کربنی [2, 11] و سرامیکی بوده است. خواص سایشی کامپوزیت‌ها تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر نوع الیاف [14]، میزان تخلخل موجود در ریزساختار [15] و نیز فرایند ساخت کامپوزیت [16] است.

بررسی عوامل تأثیرگذار در سایش لنت ترمز در هنگام ترمزگیری در پژوهشی توسط شیخ کانلو میلان و همکارانش، (۱۳۹۷) انجام شد. ایشان رفتار اثر دما، سرعت، بار و شیب متوسط زبری سطح لنت در ترمزگیری را شبیه‌سازی کرده و با صرف نظر از نیروهای مقاومت هوا و اصطکاک چرخ‌ها فرض نمودند که تمامی نیروی جنبشی اتومبیل توسط اصطکاک بین لنت و دیسک ترمز به حرارت تبدیل شده و بین لنت و دیسک ترمزها توزیع می‌شود [17].

آنالیز مواد اصطکاک لنت ترمز مورد استفاده در صنایع ریلی توسط عبدالرشید (۲۰۱۶) با انجام آزمایش‌هایی بر روی لنت‌های ترمز مورد استفاده در صنایع ریلی بررسی و درصد فولاد و آلومینیوم و همچنین اثر دمای زینتر کردن و تفاوت خواص در دماهای ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شده و با انجام سه نوع آزمون تخلخل و چگالی، سختی سنجی و آزمون سایش به ترکیب بهینه در بین ترکیبات مورد آزمایش دست پیدا کرده و به این نتیجه رسید که قطعه‌ای که در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد زینتر شده است، نسبت به دیگری (با ترکیب ثابت) نرخ سایش بیشتر و هم‌چنین ترک و تخلخل بیشتری می‌باشد [18].

درصد انقباض حجمی، چگالی و درصد تخلخل‌های باز و مقاومت به سایش به‌طور مناسبی در روش‌های متالورژی پودر قابل‌دستیابی هستند [30]. روش‌های متالورژی پودر به مقیاس وسیعی برای تولید MMCs به کار می‌روند که در آن‌ها زمینه با ذرات و الیاف و ویسکرها پر شده است. روش متالورژی پودر برای ساخت قطعات تحت شرایط سخت مانند دمای بالا و سرعت زیاد به کار می‌رود [31] و مطالعات زیادی در مورد روش‌ها و ترکیبات شیمیایی ساخت این قطعات نظیر قطعات خودرو و هواپیما مانند پد ترمز انجام شده است. آسیف و همکارانش [32] ترکیب شیمیایی بهینه ترمز را با استفاده از روش متالورژی پودر به دست آوردند. هدف از پژوهش آن‌ها دستیابی به کامپوزیتی با اصطکاک کاهش‌یافته در ترمز بوده است. آن‌ها همچنین خواص مکانیکی فولاد را در صنایع سنگین با استفاده از سه گروه آزمایشی متالورژی پودر بررسی کردند و نشان دادند که افزودنی‌هایی مانند مس مقاومت کامپوزیت را افزایش می‌دهد. علاوه بر این استحکام کششی، خواص کششی و تنش تسلیم با افزایش مقادیر افزودنی‌هایی نظیر C، SiC و Cu افزایش می‌یابد [33].

در این پژوهش سعی شده است که مقاومت به سایش کامپوزیت‌های Fe/SiC در سرعت‌های بالا و شرایط بارگذاری شدید بهبود یابد. برای این منظور کامپوزیت‌ها با استفاده از روش متالورژی پودر و با آلیاژسازی مکانیکی تهیه شدند. در این تحقیق علاوه بر بررسی COF، میزان سایش به‌عنوان یک کنترل‌کننده برای طول عمر قطعات اهمیت دارد. در مورد کاهش وزن، احتمال اطلاعات خروجی نادرست در آزمایش به‌مراتب کمتر از COF است که معیار بهتری برای نتیجه مقاومت در برابر سایش است. علاوه بر این، کاهش وزن در کل مسافت تعیین می‌کند که آیا قطعه در شرایط دمای بالا و سرعت پوشیده شده است یا خیر. در این پژوهش کامپوزیت‌هایی با خواص ذکر شده در شرایط کاری دما و سرعت بالا مورد استفاده در لنت ترمز ساخته شده و سعی شده است که مقدار مس مورد نیاز برای افزایش مقاومت به سایش و استحکام به دست آید. با توجه به اینکه در کامپوزیت‌های زمینه آهن حضور عنصری که انتقال حرارت را افزایش دهد ضروری است و یکی از این عناصر، مس است و اثر مس و میزان بهینه آن در کارایی کامپوزیت‌های زمینه آهن در دمای بالا بررسی نشده است، در این مقاله به بررسی نقش عنصر مس و میزان بهینه آن برای افزایش مقاومت به سایش در کامپوزیت زمینه آهن پرداخته شده است.

۲- مواد و روش پژوهش

۲-۱- مواد اولیه

مواد مورد استفاده در این پژوهش شامل آهن خالص ($120\mu\text{m}$)، مس ($120\mu\text{m}$)، گرافیت ($150\mu\text{m}$)، کاربید سیلیسیوم ($150\mu\text{m}$) و سولفات باریوم ($45\mu\text{m}$) می‌باشد. ترکیب شیمیایی ۵ نمونه

آهیک و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی خواص کامپوزیت Al - SiC - C - مورد استفاده در لنت ترمز را بررسی و با ساخت ۵ نمونه کامپوزیت با درصدهای مختلف کربن و انجام آزمایش‌ها و آزمون‌های مختلف از جمله آزمون سختی، آزمون سایش و بررسی میزان تراکم کامپوزیت دریافتند که افزایش میزان کربن باعث استحکام می‌شود و SiC باعث بهبود مقاومت به سایش و توزیع یکنواخت و اتصال بهتر ذرات تقویت‌کننده می‌شود. همچنین آزمایش‌ها نشان داد که با کم کردن میزان تخلخل و اتصال محکم‌تر بین ذرات می‌توان عملکرد کامپوزیت را به‌عنوان لنت ترمز افزایش داد [19].

نتایج بررسی‌های انجام شده بر روی ترمز Fe-Si-Cu نشان داده که بهبود اختلاط و میزان بهینه مس در ترکیب سبب افزایش قابل‌توجهی در مقاومت به سایش لنت و کفشک می‌شود. به‌طوری‌که میزان سایش در صفحه ترمز و کفشک آن به ترتیب ۹۰٪ و ۸۵٪ کاهش داشته است. همچنین ضریب اصطکاک در سرعت‌های کم به زیر ۰/۶ کاهش یافته است [20].

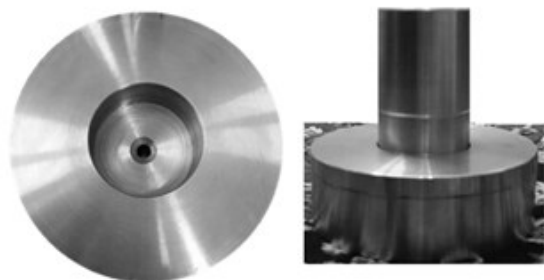
Huixian و همکاران ضریب اصطکاک کامپوزیت C/C-SiC جفت شده با کامپوزیت متالورژی پودر پایه Fe-Cu را در محیط‌های خشک، تر و مه نمکی بررسی کردند و نشان دادند که مقاومت مکانیکی ذرات سخت ساییده شده حاوی آهن، مس از فازهای دارای کربن بسیار بیشتر است [21].

Fu Chen و همکارانش کامپوزیت MMC زمینه مس را با روش متالورژی پودر تهیه کرده و کامپوزیت C/C-SiC را ساخته و بررسی کردند. بررسی آن‌ها نشان داد که افزایش ۲٪ وزنی BN هگزاگونال به کامپوزیت سبب پایداری ضریب اصطکاک در طی سیکل‌های ترمزگیری سرعت بالا می‌شود [22]. نتایج تحقیقات محققین نشان می‌دهد که انتخاب صحیح MMC به خواص مکانیکی، حرارتی و مقاومت به خوردگی بستگی دارد. ذرات سخت سرامیکی مانند SiC برای افزایش مقاومت به سایش، پایداری حرارتی و خواص اصطکاکی بهینه در MMC به کار می‌روند [23]. افزودنی‌هایی نظیر گرافیت، MoS_2 و نیتريد بور سبب پایداری تحت اصطکاک ثابت و خاصیت میرایی می‌شوند [24, 25]. مطالعات زیادی در جهت تولید کامپوزیت‌هایی با مقاومت سایشی بهتر انجام شده است. برخی از روش‌های ساخت کامپوزیت با دو نوع ذره تقویت‌کننده گسترش یافته‌اند ولی برخی از آن‌ها در حل مشکلات سایش شکست خورده‌اند. به‌طور مثال قابلیت ترشوندگی ذرات سرامیک یکی از مشکلات اصلی است که در تحقیقات اخیر به آن پرداخته شده است [26, 27]. عوامل مؤثر بر خواص کامپوزیت شامل اندازه، شکل و توزیع فازی تقویت‌کننده‌ها، خواص مکانیکی زمینه و ماهیت فصل مشترک فاز زمینه است [28]. روش‌های مختلفی برای ساخت MMC وجود دارد که به دودسته حالت مایع و حالت جامع تقسیم‌بندی می‌شوند [29]. خواص فیزیکی مکانیکی قطعات شامل سختی،

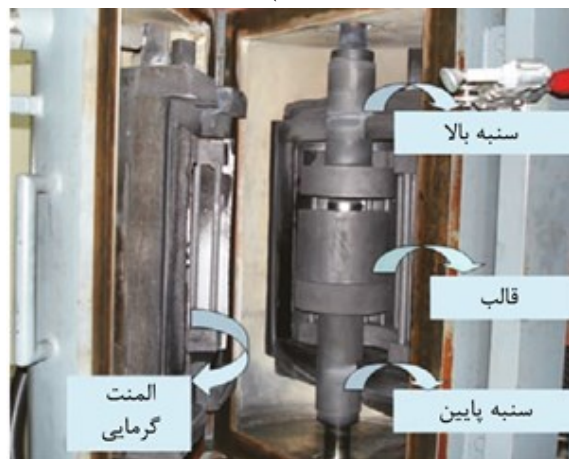
کامپوزیتی در جدول (۱) ارائه شده است. با توجه به این جدول درصدهای حجمی گرافیت، SiC و سولفات باریم ثابت بوده و درصد حجمی مس در ۵ نمونه به ترتیب ۳٪، ۷٪، ۱۱٪، ۱۵٪ و ۱۷٪ است.

جدول (۱) درصد حجمی نمونه‌های آزمایش

| نام نمونه | درصد حجمی هر فاز | | | | |
|-----------|-------------------|-----|-----|----|------------|
| | BaSO ₄ | C | SiC | Cu | Fe |
| A | ۶ | ۶/۵ | ۶ | ۳ | باقی‌مانده |
| B | ۶ | ۶/۵ | ۶ | ۷ | باقی‌مانده |
| C | ۶ | ۶/۵ | ۶ | ۱۱ | باقی‌مانده |
| D | ۶ | ۶/۵ | ۶ | ۱۵ | باقی‌مانده |
| E | ۶ | ۶/۵ | ۶ | ۱۹ | باقی‌مانده |



(الف)



(ب)

شکل ۱. الف) قالب ساخته شده برای پرس پودرها، ب) طرح‌واره و دستگاه پرس گرم

۲-۲- اختلاط پودر

پودرها با نسبت گلوله به پودر ۱ به ۱۰ به مدت ۲۰ تا ۳۰ دقیقه، هم‌زمان در آسیاب سیاره‌ای با سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه در دمای محیط با همدیگر مخلوط شدند. به علاوه از گاز خنثی آرگون برای جلوگیری از اکسید شدن پودرها به عنوان اتمسفر استفاده شده است. گلوله‌های مورد استفاده در آسیاب از فولاد زنگ‌نزن ساخته شده‌اند.

۲-۳- روش ساخت کامپوزیت

از روش متالورژی پودر برای ساخت نمونه‌های آزمایشی کامپوزیتی استفاده شد. برای این منظور، از پرس سرد برای شکل‌دهی و تراکم اولیه پودرها استفاده شد. سپس پودرها با استفاده از روش متالورژی پودر تحت پرس گرم قرار گرفتند. برای این منظور از کوره الکتریکی با دمای ۱۵۰۰ C استفاده شد. پرس گرم و زینتر شدن به مدت ۳۰ min انجام شد. فشار مورد استفاده در این فرایند ۴۰۰ MPa و اتمسفر کوره برای جلوگیری از اکسید شدن برخی افزودنی‌ها مانند گرافیت، آرگن بوده است. سرد شدن نمونه‌ها نیز در کوره انجام شده است. شکل (۱-الف) قالب ساخته شده را نشان می‌دهد. دمای زینترینگ ۱۰۰۰ °C و مدت زمان آن یک ساعت در نظر گرفته شد. در نتیجه فرایند هم‌زمان پرس گرم و زینترینگ، نمونه‌ها به میزان ۵۰٪ کاهش حجم دادند. نمونه‌های حاصل بررسی اولیه شدند و علائمی نظیر کاهش حجم، فاز پلاستیک تشکیل شده در گوشه‌های نمونه نشان‌دهنده فرایند پرس و زینترینگ مناسب و چگالی خوب قطعه تمام شده بود. در این پژوهش ۵ نمونه کامپوزیتی با درصد مس متفاوت تهیه شد.

۲-۴- آزمایش سایش

آزمون سایش با استفاده از دستگاه پین روی دیسک مطابق با استاندارد ASTM G90 در دمای محیط و تحت اتمسفر در مسافت ۱۰۰۰m انجام شد. دستگاه از نوع دور ثابت و دارای دیسکی از نوع چدن خاکستری و با زمینه پرلیتی و با سختی سطحی HB179-299 است. فولاد AISI 52 با سختی HRC ۶۷ به عنوان پین استفاده شد. نمونه‌ها به ابعاد ۵mm×۲۴mm×۲۴mm بریده شدند. قبل از انجام آزمون سایش، آزمون بارپذیری بر نمونه مرجع انجام شد تا حداکثر بار اعمالی بر نمونه‌ها در دستگاه تعیین شود؛ بنابراین نیروی اعمالی ۲۰ N و سرعت لغزش ۷۰۰rpm و نرخ نمونه‌برداری ۵۰۰ Hz تعیین شد. قبل از انجام آزمون تمام نمونه‌ها با کاغذ سنباده ۱۵۰۰ پولیش شدند تا زبری سطحی نسبی ۰/۰۲ μm به دست آید. با استفاده از این دستگاه ضریب اصطکاک و میزان سایش در دماهای مختلف و تحت بار یا گشتاور ثابت اعمالی بر روی لنت ترمز اندازه‌گیری شد. برای انجام آزمون، نمونه در محل نمونه‌گیر قرار گرفته و ترمزگیری تا زمانی انجام شد که سطح نمونه به‌طور یکنواخت ساییده شده و حداقل ۹۰ درصد تماس بین دیسک و سطح نمونه ایجاد گردید. برای محاسبه افت وزن، پس از هر ۱۰۰ آزمون متوقف شده و نمونه‌ها با استن تمیز شده و با ترازوی دیجیتال توزین شدند. هر آزمون سه بار در نمونه جدا برای تصدیق نتایج انجام شد.

XMU و میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی FESEM با مدل MIRA3TESCAN-XMU بررسی شد.

۳- نتایج و بحث

بر اساس ۵ نمونه آزمایش با تغییر درصد مس برای دستیابی به مقدار بهینه مس در کامپوزیت جهت کاربرد در لنت ترمز به صورت جدول (۲) در نظر گرفته شد. سولفات باریوم نیز به دلیل افزایش سختی، به نمونه‌ها اضافه شد.

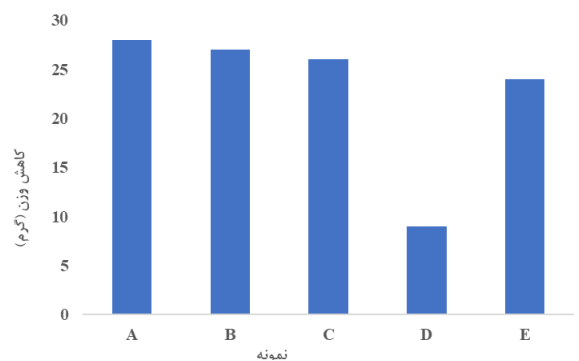
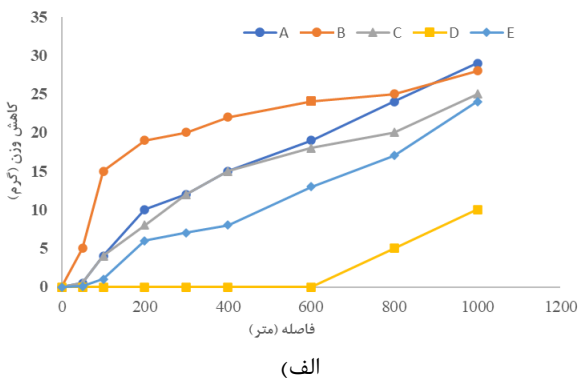
جدول (۲) مشخصات نمونه‌های آزمایش

| نام نمونه | درصد حجمی فازهای تشکیل‌دهنده | روش ساخت |
|-----------|--|---------------------|
| A | Fe-78.5, Cu-3, SiC-6, C-6.5, BaSO ₄ -6 | پرس و زینتی هم‌زمان |
| B | Fe-74.5, Cu-7, SiC-6, C-6.5, BaSO ₄ -6 | پرس و زینتی هم‌زمان |
| C | Fe-70.5, Cu-11, SiC-6, C-6.5, BaSO ₄ -6 | پرس و زینتر هم‌زمان |
| D | Fe-66.5, Cu-15, SiC-6, C-6.5, BaSO ₄ -6 | پرس و زینتر هم‌زمان |
| E | Fe-62.5, Cu-19, SiC-6, C-6.5, BaSO ₄ -6 | پرس و زینتر هم‌زمان |

۳-۱- نتایج آزمون سایش و فرسایش (پین روی دیسک)

۳-۱-۱- کاهش وزن برحسب مسافت

نمودار میزان کاهش وزن نمونه‌ها در فاصله ۱۰۰۰ متر در شکل (۲) الف) نشان داده شده است.



ب)

شکل (۲) الف) نمودار میزان کاهش وزن نمونه‌ها برحسب گرم در فاصله ۱۰۰۰ متر، ب) نمودار میله‌ای کاهش وزن نمونه‌ها برحسب گرم در فاصله ۰ تا ۱۰۰۰ متر

پس از مرحله آماده‌سازی در مرحله اولیه نمونه با دقت ۰/۱ gr توزین شد و سپس با سرعت دورانی ۷۰۰ دور در دقیقه ترمزگیری آغاز شد. عملیات ترمزگیری در ۲۰ مرحله ۱۰ ثانیه‌ای و با توقف ۱۰ ثانیه‌ای بین هر دو ترمز انجام شد. دمای سطح دیسک نیز با استفاده از دستگاه خنک‌کننده در دمای کمتر از $15 \pm 1^\circ\text{C}$ نگه‌داشته شد.

در مرحله حرارتی دستگاه خنک‌کننده خاموش شده و ترمزگیری بدون توقف و به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد تا دمای سطح دیسک به دمای $35 \pm 1^\circ\text{C}$ رسید.

در مرحله تکمیلی دستگاه خنک‌کننده مجدداً روشن شده تا دمای دیسک مجدداً به دمای $15 \pm 1^\circ\text{C}$ برسد. سپس عملیات ترمزگیری مجدداً مانند مرحله اول تکرار شد.

پس از گذشت سه مرحله نمونه مجدداً توزین شده و نرخ سایش ویژه (S.W) توسط دستگاه سایش مطابق فرمول (۱) محاسبه گردید [۳۴].

$$S.W. = \frac{m_1 - m_2}{2\pi R \cdot N \cdot F_m} \quad (1)$$

در این رابطه:

S.W: نرخ سایش ویژه

R: شعاع سطح دیسک (m)

N: تعداد دوران در یک آزمون کامل

F.m: میانگین نیروی سایش (N)

m_1: وزن اولیه نمونه (gr)

m_2: وزن نهایی نمونه (gr)

مطابق استاندارد ملی ایران شماره ۵۸۶ [۳۵]، نرخ سایش مجاز در طی آزمون باید بین ۰/۲۸ تا ۰/۶ و حداکثر نرخ فرسایش ویژه باید $304 \text{ g/N.m} \times 10$ باشد.

۲-۵- آزمون سختی و چگالی

سختی‌سنجی راکول A بر اساس استاندارد ASTM D785 و با استفاده دستگاه مدل ROCKY, Koopa ساخت ایران) با نیروی ۶۰kg و فرورونده مخروط الماسه با زاویه ۱۲۰° انجام شد. آزمون بر هر نمونه در سه نقطه انجام شد و مقدار متوسط آن‌ها به عنوان عدد سختی اعلام شد. چگالی نمونه‌ها طبق قانون ارشمیدس اندازه‌گیری شد.

۲-۶- مشخصه‌یابی ساختاری

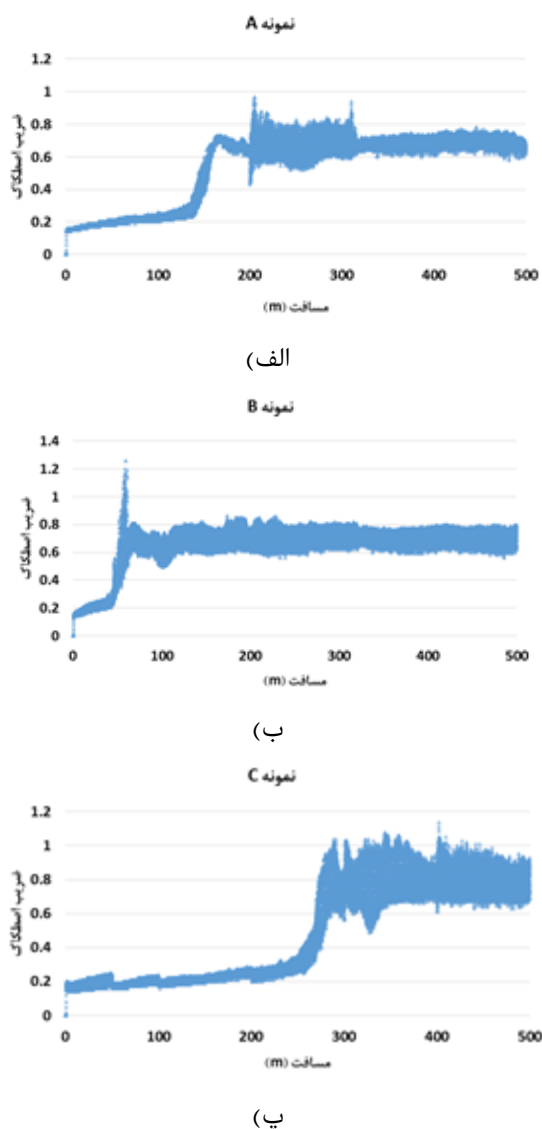
ابتدا نمونه‌ها به کمک کاغذ سنباده ۸۰، ۱۲۰، ۳۲۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰ و ۲۴۰۰ آماده‌سازی شده سپس با استفاده از پودر آلومینای ۱ μm و ۱ μm ۰/۰۵ پولیش نهایی شدند. در نهایت با استفاده از محلول کلرید فربیک (20mL HF, 30mL HNO₃) به مدت ۱۱S اچ شدند. از میکروسکپ نوری Olympias برای مشخصه‌یابی استفاده شد [۳۶].

سطوح سایش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی آزمایشگاه متالورژی رازی (SEM, EDAX) مدل VEGA//TESCAN-

می‌توان به محصولات سایش نسبت داد. باین وجود پس از یک فاصله خاص (حدود ۵۰۰ m) ذراتی که در اثر سایش بین دو سطح ایجاد شده‌اند با پین تماس پیدا می‌کنند و در نهایت منجر به سایش و کاهش وزن بیشتر نمونه‌ها می‌شوند. مقایسه نتایج با نتایج الیوریا [37] و همکاران نشان می‌دهد که کاهش وزن کمتر از کامپوزیت Fe-Cu-SiC است که می‌تواند به دلیل حضور گرافیت به‌عنوان یک روان‌کننده خودکار و درصد بالاتر SiC در نمونه مورد مطالعه در این پژوهش باشد.

۳-۱-۲- ضریب اصطکاک

طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۵۸۶ [35]، ضریب اصطکاک لنت ترمز در آزمون سایش و فرسایش باید در حدود ۰/۲ تا ۰/۴ باشد. نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده برای نمونه‌های آزمایش در طی مسافت ۵۰۰ متر در شکل (۳) ارائه شده است.



یکی از ویژگی‌های مهم لنت، داشتن کاهش وزن کمتر در آزمون سایش است [37]. عملکرد دو نمونه A و C در مسافت ۱۰۰۰ متر تقریباً مشابه بوده و وضعیت نمونه C تا حدی بهتر است و کاهش وزن مطلوبی دارد. نمونه B بدترین عملکرد را بین نمونه‌ها داشته است و کمترین مقاومت به سایش را دارد. کاهش وزن نمونه D از ابتدای آزمون تا نیمه آزمون تقریباً ثابت بوده و پس از آن تا مسیر ۱۰۰۰ m افزایش یافته است. باین وجود تفاوت کاهش وزن این نمونه با نمونه B که بدترین عملکرد را از خود نشان داده است حدود ۲۰ گرم است. این نمونه در ابتدای آزمون افزایش در میزان کاهش وزن را نشان داده است و به نظر نمی‌رسد که مقاومت به سایش خوبی داشته باشد و تا پایان آزمون نیز کاهش وزن بیشتری نسبت به چهار نمونه دیگر نشان داده است. در میانه آزمون یعنی مسافت ۵۰۰ متر دو نمونه A و C تقریباً وضعیت مشابهی دارند. با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که کاهش وزن نمونه B تفاوت زیادی با سایر نمونه‌ها نشان داده است. نشان‌دهنده مقاومت به سایش نامناسب این نمونه است. نمونه‌های D و پس از آن E بهترین مقاومت به سایش و B بدترین وضعیت را در مقابل سایش دارد. وضعیت نمونه‌های A و C بینابین می‌باشد.

نمودار میله‌ای کاهش وزن نمونه‌ها در فاصله ۰ تا ۱۰۰۰ متر در شکل (۲) نشان داده شده است:

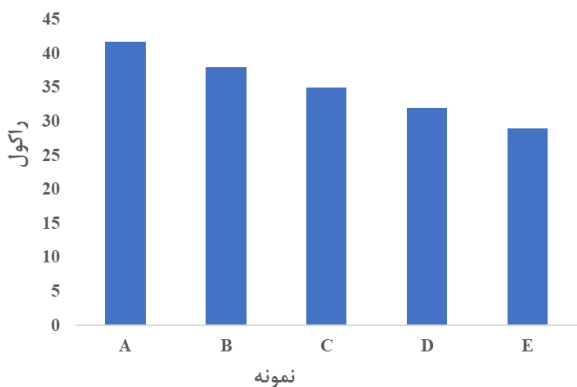
با بررسی درصد حجمی مس در نمونه‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که نمونه D با ۱۵٪ و پس از آن نمونه E با ۱۹٪ مس بهترین مقاومت به سایش را دارند؛ یعنی با افزایش مقدار مس تا مقدار ۱۵٪ مقاومت به سایش لنت ترمز افزایش می‌یابد و از این مقدار به بعد مجدداً با افت مقاومت به سایش با افزایش مس مواجه می‌شویم. همچنین نمونه‌های A و B و سپس با ۷٪، ۳٪ و ۱۱٪ مس مقاومت به سایش کمتری دارند.

از طرفی با توجه به اینکه میزان کاهش وزن نمونه شاهد (نمونه برگرفته از لنت ترمز هواپیما) ۱۵ گرم در فاصله ۱۰۰۰ متر بوده است، می‌توان نتیجه گرفت کاهش وزن نمونه D ۶۶٪ کاهش وزن نمونه شاهد بوده است. به عبارتی، نمونه D از نظر کاهش وزن نسبت به شاهد، ۴۴٪ بهبود عملکرد داشته است. علت این مسئله را می‌توان افزایش مقدار مس در نمونه D نسبت به شاهد از ۱۱٪ به ۱۵٪ دانست. با توجه به این که مس ضریب هدایت حرارتی بالایی دارد، در دما و سرعت بالا، باعث افزایش انتقال حرارت بیشتری در لنت شده و این حرارت نقش اتصال‌دهنده بین ذرات تشکیل‌دهنده لنت را داشته و از کاهش وزن لنت در اثر سایش می‌کاهد. با افزایش مقدار مس در لنت ترمز تا ۱۵٪ می‌توان مقاومت به سایش آن را افزایش داد. تغییرات شدید کاهش وزن نمونه B نسبت به نمونه D و نیز افزایش در کاهش وزن نمونه‌ها بعد از مسافت ۵۰۰ m

افزایش ضریب اصطکاک در این نمونه جلوگیری می‌کند و می‌توان گفت مقدار بهینه مس، ۱۵٪ است.

۳-۲- نتایج آزمون سختی سنجی

نتایج آزمون سختی سنجی راکول (میانگین سه نمونه) در شکل (۴) ارائه شده است.



شکل (۴) نتایج آزمون سختی سنجی

نتایج آزمون سختی سنجی نشان می‌دهد که با افزایش درصد مس، میزان سختی نمونه‌ها کمتر شده است. بیشترین سختی مربوط به نمونه A با کمترین درصد مس است. با توجه به اینکه سختی مس نسبت به زمینه آهن کمتر است، با افزایش میزان مس در نمونه‌ها سختی کاهش می‌یابد. نمونه A با کمترین مقدار مس سختی بالاتری نسبت به نمونه‌های دیگر نشان می‌دهد که می‌تواند به انتقال مؤثر بار از زمینه به تقویت‌کننده نسبت داده شود.

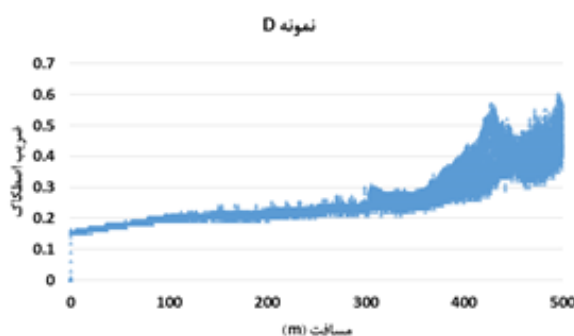
۳-۳- نتایج آزمون چگالی

نتایج این آزمون در جدول (۳) ارائه شده است.

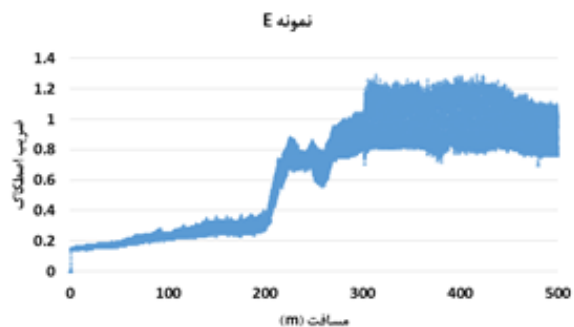
جدول (۴) نتایج آزمون چگالی

| نمونه | چگالی (gr/cm ³) |
|-------|-----------------------------|
| A | ۶/۳۸ |
| B | ۶/۵۴ |
| C | ۶/۶۵ |
| D | ۶/۸۲ |
| E | ۶/۹۳ |

نتایج آزمون چگالی نشان می‌دهد با توجه به اینکه چگالی مس بیشتر از آهن است، در نمونه‌هایی که درصد مس بیشتر است، چگالی بیشتر می‌باشد؛ بنابراین نمونه‌های D و E که به ترتیب ۱۵ و ۱۹ درصد مس دارند بیشترین چگالی را نیز دارا می‌باشند. نمونه A با کمترین درصد مس یعنی ۳ درصد کمترین چگالی می‌باشد. همچنین می‌توان گفت که حضور سولفات باریم برای پرکردن فضای بین ذرات مؤثر بوده است و سبب افزایش چگالی می‌شود.



(ت)



(ث)

شکل (۳) نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت برای نمونه‌های آزمایش

الف- نمونه A ب- نمونه B پ- نمونه C ت- نمونه D ث- نمونه E

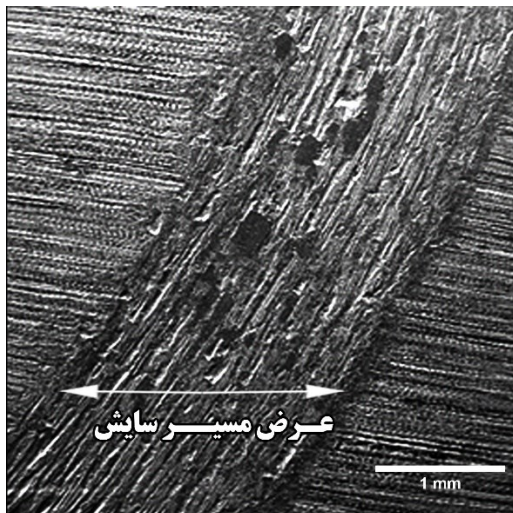
همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ضریب اصطکاک در طول آزمایش بسیار نوسان داشته است. کاهش ضریب اصطکاک نشان‌دهنده اثر روانکاری خودکار در نمونه است [39, 40]. با این حال این روانکاری به این معنا نیست که پارامتر کاهش وزن کمتر است [41, 42]. با این وجود مشخص است که ضریب اصطکاک نمونه D دارای نوسان کمتری بوده و در حدود ۰/۲ تا ۰/۴ است. نمونه‌های C و E دارای بیشترین نوسان بوده و ضریب اصطکاک متوسط بیشتری دارند. در تمام نمونه‌ها مشاهده می‌شود که در ابتدا ضریب اصطکاک کم است و پس از آن به یک روند تقریباً یکنواخت می‌رسد. در ابتدای آزمون سایش، بخشی از سطح نمونه سایش پیدا کرده که باعث خروج ذرات کربن و تشکیل یک فیلم کربنی شده است. فیلم‌های کربن بین نمونه و پین به‌عنوان یک روان‌کننده جامد عمل کرده و ضریب اصطکاک را کاهش می‌دهند [43]. با این حال پس از حذف ذرات کربنی ضریب اصطکاک دوباره افزایش می‌یابد و این چرخه تکرار می‌شود. عامل دیگری که باعث کاهش ضریب اصطکاک می‌شود، حضور ذرات سخت SiC است. نمونه‌های B و پس از آن A بعد از نمونه D دارای نوسان کمتر و ضریب اصطکاک متوسط کمتری هستند؛ بنابراین نمونه D بهترین وضعیت را از نظر ضریب اصطکاک دارد می‌توان گفت مس با رسانایی حرارتی بالا مانع از افزایش ناگهانی دما در طول سایش شده و در نتیجه از

۳-۴- نتایج بررسی ریزساختار

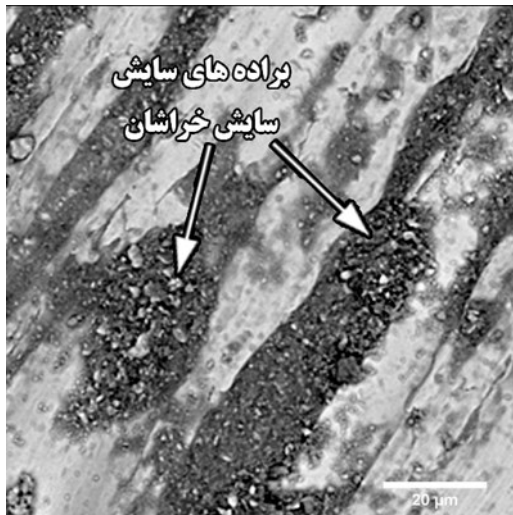
با توجه به این که نمونه D تنها نمونه‌ای بود که چهار ویژگی مهم یک لنت خوب یعنی کاهش وزن کمتر در آزمون سایش، ضریب اصطکاک در حد استاندارد، سختی کافی و چگالی مناسب را دارا بود، بنابراین برای انجام مطالعات میکروسکوپی این نمونه انتخاب شد و مورد مطالعه میکروسکوپ الکترونی SEM قرار گرفت.

در شکل (۵) تصاویر میکروسکپ الکترونی روبشی نمونه D و سطح نمونه بعد از آزمون سایش پین روی دیسک نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵-الف مشاهده می‌شود، در عرض ناحیه تحت سایش شیارهای موازی در جهت لغزش وجود دارند که نشان‌دهنده سایش خراشان است، این مکانیزم به دلیل تماس سطح نرم (به دلیل 66.5% Fe و 6% SiC) و سطح سخت در طول لغزش رخ می‌دهد. تماس بین سطوح سخت و نرم در حین سایش باعث ایجاد شیارهایی در سطح نرم می‌شود. این در نهایت باعث ایجاد تعداد زیادی فرورفتگی و شیارهای کشیده شده بر روی سطح می‌شود [44]. این ذرات سایش با پیکان در شکل ۵-ب مشخص شده‌اند. تصاویر با بزرگنمایی بیشتر در شکل ۵-پ برآمدگی و فرورفتگی سطح اطراف ذرات SiC را نشان می‌دهند که به دلیل سایش خراشان ایجاد شده و باعث بیرون‌زدگی و برجستگی ذرات SiC در سطح شده است. همان‌طور که ذرات SiC بیرون می‌زنند، نرخ سایش و COF کاهش می‌یابد به دلیل تماس بیشتر پین با ذرات سرامیکی تا زمانی که ذرات SiC از ماتریس کنده شوند و این فرایند به صورت چرخه‌ای تکرار شود. سایش خراشان می‌تواند به دلیل کنده شدن همین ذرات باشد [45].

شکل ۵-ت سطح ساییده شده نمونه D را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مکانیزم سایش در این نمونه ترکیبی از سایش خراشان و چسبان است. شکل ۵-ث سایش چسبان را به وضوح نشان می‌دهد. سایش چسبان در این نمونه ممکن است به دلیل سطح کاملاً ناهموار نمونه تولید شده یا درگیری مکانیکی سطح در طول آزمایش باشد. در این حالت، به دلیل دمای بالا که توسط اصطکاک ایجاد شده است، یک تکه نازک از سطح ماده به سطح دیگر چسبیده و باعث درگیری و ایجاد تنش در چندین نقطه مختلف می‌شود. این امر منجر به تغییر شکل پلاستیک (شکل‌های ۵-پ و ۵-ج) و اتصالات محلی می‌شود و در نهایت ماده از یک سطح به سطح دیگر منتقل می‌شود. سایش چسبان را می‌توان به تئوری نفوذ نسبت داد. در شکل ۵-ت شیارهای کم‌عمق دیده می‌شوند که نشان‌دهنده ترکیبی از مکانیزم‌های سایش هستند. در این تصاویر، سایش خراشان و چسبان هر دو مشاهده می‌شوند. از سوی دیگر، با وجود ذرات SiC، تراکم نایجایی‌ها به دلیل عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی در فصل مشترک فاز سخت/فاز نرم افزایش می‌یابد که این امر استحکام را افزایش داده و در نتیجه نرخ سایش را کاهش می‌دهد [43].



(الف)

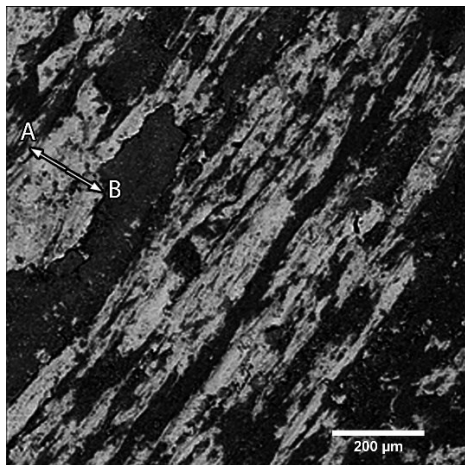


(ب)



(پ)

کندگی ذرات کمتر صورت گرفته و اثبات دیگری بر این موضوع است که افزایش کاربید سیلیسیوم در لنت، میزان مقاومت به سایش آن را افزایش می‌دهد.



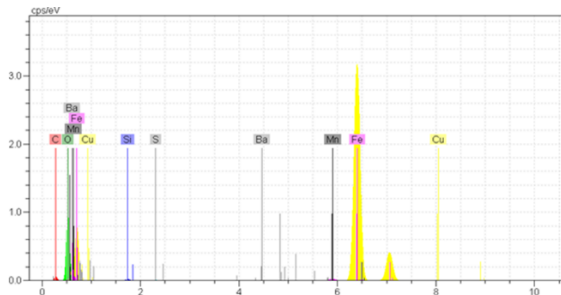
شکل ۶) تصاویر BSE مربوط به نمونه D

همچنین تشکیل لایه سایشی در سطح نمونه که قبلاً نیز توسط برخی محققین ثابت شده است [13, 37]، باعث پایداری عدد سایش مخصوصاً در دماهای بالا شده و در نهایت منجر به کاهش میزان فرسایش لنت می‌شود [49, 50] بنابراین با توجه به شکل (۶) در قسمت‌هایی که لایه سایشی تشکیل شده، فرسایش لنت کمتر صورت گرفته است. این قسمت‌ها در تصاویر با بزرگنمایی بیشتر (شکل ۵)، واضح‌تر می‌باشد.

۳-۵- نتایج آزمایش آنالیز EDAX

۳-۵-۱- آنالیز نقطه‌ای

برای تشخیص فیلم سایشی، از آنالیز EDS بر روی سطح نمونه بعد از آزمون سایش پین روی دیسک استفاده شد. شکل (۷- الف) نتایج آنالیز ترکیبی به صورت نقطه‌ای را که در دونقطه انجام شده، نشان می‌دهد.



الف)



ت)



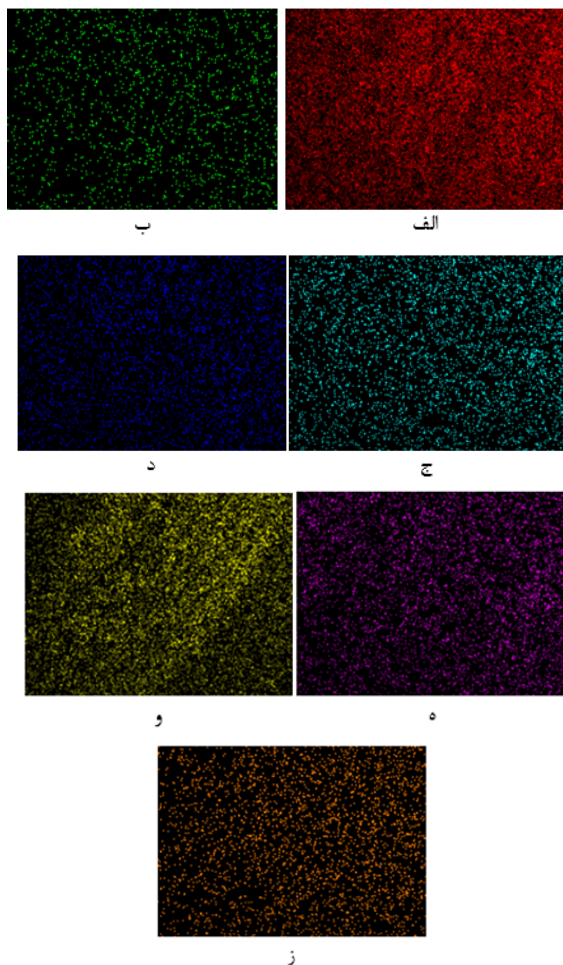
ث)



ج)

شکل ۵) تصاویر SE مربوط به نمونه D در بزرگنمایی‌های مختلف

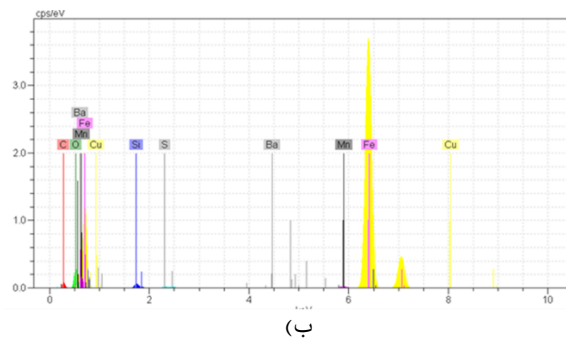
شکل (۶) تصویر با آشکارساز برگشتی (BSE) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۶) در مناطقی که فاز روشن دیده می‌شود، کاربید سیلیسیوم وجود دارد و همان‌طور که قبلاً گفته شد این ماده مقاومت به سایش را افزایش می‌دهد [47-49]. در این مناطق نیز



شکل ۸) میزان و پراکندگی فازها الف- آهن ب- مس ج- گوگرد د- باریوم ه- سیلیسیم و- اکسیژن ز- کربن

در این شکل وجود ذرات سایش و افزودنی‌های دیگر به ماتریس Fe در کامپوزیت نشان داده شده است. با توجه به این‌که آهن بیشترین درصد حجمی را بین عناصر تشکیل‌دهنده دارد، بنابراین تراکم نقاط در شکل مربوط به پراکندگی آهن از بقیه شکل‌ها بیشتر است. بعد از آن اکسیژن از تراکم بیشتری نسبت به بقیه عناصر برخوردار است. علت این مسئله را می‌توان ایجاد لایه سایشی در طی آزمون سایش و فرسایش دانست. این لایه بر اثر ذوب فلزات و ترکیب شدن آن‌ها با سایر مواد بر اثر اصطکاک در دمای بالا ایجاد می‌شود؛ بنابراین اکسیژن هوا تحت این شرایط با مواد موجود در سطح نمونه واکنش داده و درصد حضور آن در لایه سایشی بالا رفته است و منجر به ایجاد مکانیسم سایش اکسیداسیون شده است.

سایر عناصر از تراکم کمتری برخوردارند. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که عملیات اختلاط مواد به خوبی انجام شده و ذرات از توزیع نسبتاً یکنواختی برخوردارند همچنین حضور اکسیژن در سطح نمونه قابل ملاحظه است که مسیر سایش را شامل می‌شود. این بیانگر تشکیل لایه اکسیدی از فازهای تشکیل‌دهنده نمونه در حین سایش است.



شکل ۷) الف- نتایج آزمون EDS در نقطه A از سطح نمونه، ب- نتایج آزمون EDS در نقطه B از سطح نمونه

با توجه به شکل (۷-ب) در نقطه B مورد بررسی نیز عناصر موجود در لنت و نیز منگنز دیده می‌شود که باز هم نشان می‌دهد فیلم سایشی تشکیل شده و منگنز از سطح دیسک به این لایه منتقل شده است؛ بنابراین میزان سایش با تشکیل این لایه سایشی کاهش می‌یابد.

نتایج کمی در نقطه A نشان می‌دهد که بالاترین درصد وزنی مربوط به آهن (Fe) زمینه کامپوزیت است و بیشترین فراوانی را دارد. پس از آن درصد وزنی اکسیژن و گرافیت (سیاه تیره) بالاترین درصدهای وزنی را دارند. دومین قله که ضعیف‌تر است مربوط به گوگرد است. در شکل، نقاط سیاه بزرگ به ذرات SiC مربوط هستند. علاوه بر این، در آنالیز EDS مشاهده می‌شود که سیلیسیم و کربن هم‌زمان وجود دارند و پیک آن‌ها تقریباً برابر است. تحلیل این نقطه نشان می‌دهد که حضور هم‌زمان C و Si در این نقطه همان ترکیب SiC در ماده اولیه با ۶٪ حجمی است که درصد وزنی کل در این نقطه را تشکیل می‌دهد؛ بنابراین، این همان SiC است. مقدار کمی اکسیژن و منگنز (Mn) نیز در این نقطه مشاهده می‌شود. وجود Mn احتمالاً به ناخالصی‌های مواد اولیه مربوط است. با توجه به اینکه در این نقطه باریوم وجود ندارد نمی‌توان ادعا کرد که BaSO4 در این نقطه حضور دارد. در مجموع نتایج نشان‌دهنده توزیع یکنواخت عناصر آلیاژی در ماتریس فلزی پایه آهن و تشکیل یکنواخت کامپوزیت است. علاوه بر این، توزیع سطحی ذرات Cu در ماتریس آهن به وضوح دیده می‌شود.

۳-۵-۲- آنالیز صفحه‌ای

برای بررسی دقیق‌تر پراکندگی فازها در نمونه از تصاویر X-Ray Map استفاده شده است. شکل (۸) این نتایج را نشان می‌دهد. در این تصاویر رنگ قرمز معرف آهن، رنگ سبز مس، سبز کمرنگ گوگرد، رنگ آبی باریوم، رنگ صورتی سیلیسیم، رنگ زرد اکسیژن و رنگ نارنجی کربن است.

می‌تواند در اثر تشکیل لایه سایشی بعد از آزمون پین روی دیسک در آن به وجود آمده باشد. بیشترین درصد عناصر مربوط به آهن و اکسیژن و سپس مس و کربن می‌باشد. این نتایج مطابق با نتایج به‌دست‌آمده از نمونه D می‌باشد و بنابراین نمونه D به‌عنوان نمونه‌ای که از نظر نتایج آزمون سایش، ضریب اصطکاک، سختی، چگالی و آزمون‌های بررسی ریزساختار مورد تأیید می‌باشد، انتخاب می‌گردد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله کامپوزیت مقاوم به سایش زمینه فلزی Fe-SiC-Cu-G طراحی و تحت عملیات پرس و دمای بالای هم‌زمان ساخته شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که نمونه کامپوزیت D با ترکیب شیمیایی $66.5 \text{ Fe}-15\text{Cu}-6\text{SiC}-6.5\text{C}-6 \text{ BaSO}_4$ بهترین خواص را دارا بوده است. نتایج آزمایش‌های پین روی دیسک، آنالیز SEM، سختی‌سنجی و دانسیته نشان داد که مقاومت به سایش کامپوزیت نمونه D با ۱۵ درصد مس و سپس نمونه E با ۱۹ درصد مس از سایر نمونه‌ها بالاتر بوده است. همچنین در آزمون ضریب اصطکاک فقط نمونه D از نظر ضریب اصطکاک در محدوده مجاز استاندارد است. آزمون سختی‌سنجی نیز نشان داد با توجه به اینکه سختی مس کمتر از آهن است، با افزایش درصد مس، میزان سختی نمونه‌ها کمتر شده است ولی نمونه D دارای سختی قابل قبول برای کاربردهای دمابالا است. نتایج آزمون بررسی ریزساختار نشان داد سایش از نوع سایش خراشان و چسبان می‌باشد ولی در برخی نقاط سایش اکسیداسیون هم مشاهده شده است. همچنین در مناطقی که فاز روشن دیده می‌شود، کاربید سیلیسیوم وجود دارد و در این مناطق کندگی ذرات کمتر صورت گرفته و نشان‌دهنده افزایش میزان مقاومت به سایش در اثر افزایش کاربید سیلیسیوم در کامپوزیت است.

در نهایت می‌توان گفت که افزایش مقدار مس میزان انتقال حرارت را بالا می‌برد و کم بودن آن باعث کاهش انتقال حرارت و تجمع حرارت در داخل لنت و ایجاد نقاط داغ شده که تخریب لنت را به همراه دارد؛ بنابراین بین این دو حالت بحرانی، حالت بهینه بر اساس نتایج آزمایش‌ها نمونه D با ۱۵٪ مس، ۶۶/۵٪ آهن، ۶/۵٪ گرافیت، ۶٪ کاربید سیلیسیوم و ۶٪ سولفات باریوم است.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده و همچنین برای چاپ به نشریه دیگری فرستاده نشده است.

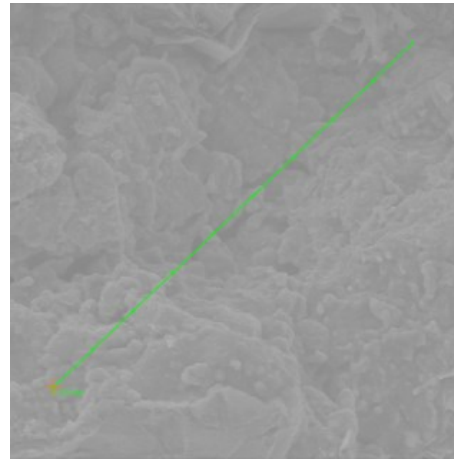
تعارض منافع: مقاله حاضر هیچگونه تعارض منافی با سایر سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

منابع

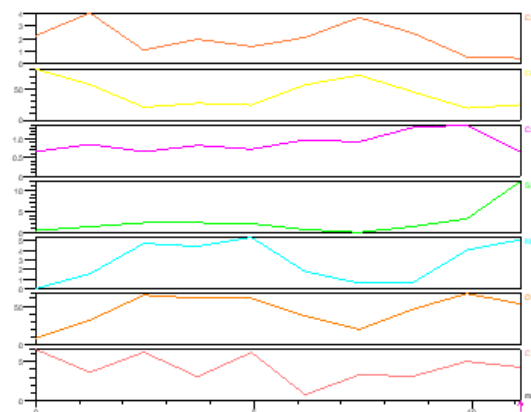
1-Torralba JD, Da Costa CE, Velasco F. P/M aluminum matrix composites: an overview. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003 Feb 1;133(1-2):203-6.

۳-۵-۳- نتایج آنالیز خطی (اسکن خطی)

شکل (۹ الف) نقاطی که در آزمون اسکن خطی برای بررسی درصد فازها در نمونه اصلی انتخاب شده‌اند را نشان می‌دهد. برای انتخاب این نقاط، ۱۰ نقطه با فاصله یکسان بر روی یکی از اقطار سطح موردبررسی در نظر گرفته شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۹ الف) موقعیت نقاط در آزمون اسکن خطی ۱، (ب) نتایج اسکن خطی نمونه، عناصر از بالا به پایین: مس، آهن، کلسیم، سیلیسیوم، منیزیم، اکسیژن و کربن

در شکل (۹ ب) میزان حضور هر یک از فازها در ناحیه موردبررسی نشان داده شده است. این بررسی در طول خطی با اندازه ۱۰ میلی‌متر انجام شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود خطوط دارای نوسان هستند که نشان می‌دهد تراکم فاز موردنظر در برخی نقاط بیشتر و در برخی کمتر است. با دقت در شکل مشخص می‌شود آهن و اکسیژن که دارای بیشترین تراکم هستند دارای نوسانات معکوس می‌باشند؛ یعنی نقاطی که در آن فاز آهن بیشتر است، اکسیژن کمتر بوده و برعکس.

طبق این نتایج، نمونه اصلی آزمایش از فازهای آهن، مس، کربن و سیلیسیوم تشکیل شده است. البته مقداری ناخالصی نیز در آن مشاهده می‌شود که شامل منیزیم، کلسیم و اکسیژن است و

- 17-Sheikh Kanlu M, Milan E. Investigation of factors affecting brake pad wear during braking. In: Proceedings of the First International Conference on New Approaches in Engineering Sciences; 2018.
- 18-Rahman A. AR Friction Material (Metal Reinforcement) Analysis of Brake Pad for Light Rail Train System (Doctoral dissertation, Master's Thesis, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, Johor, Malaysia). 2016.
- 19-Abhik R, Umasankar V. Evaluation of properties for hybrid Al-SiC-carbon fiber reinforced metal matrix composite for brake pads. In 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT) 2016 Mar 3 (pp. 789-793). IEEE.
- 20-Ma X, Fan S, Luan C, Li W, Deng J, Cheng L, Zhang L. Effect of Cu addition on the braking performance of Fe-Si alloy-modified C/C-SiC brake materials. *Wear*. 2021 Jul 18;477:203851.
- 21-Tang H, Li P, Li Z, Li J, Zhao J, Xu Y, Li Y, Xiao P. Braking behaviours of C/C-SiC mated with iron/copper-based PM in dry, wet and salt fog conditions. *Ceramics International*. 2022 Feb 1;48(3):3261-73.
- 22-Chen FU, Li Z, Zou LF, Ma WJ, Li JW, Chen Z, Niu ZB, Liu PF, Xiao P. Tribological behavior and mechanism of h-BN modified copper metal matrix composites paired with C/C-SiC. *Tribology International*. 2021 Jan 1;153:106561.
- 23-Prasad RC. Composites, science, and technology. New Age International; 2000.
- 24-Zhang Y, Li C, Jia D, Zhang D, Zhang X. Experimental evaluation of the lubrication performance of MoS₂/CNT nanofluid for minimal quantity lubrication in Ni-based alloy grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015 Dec 1;99:19-33.
- 25-Duan Y, Fu H, Zhang L, Gao R, Sun Q, Chen Z, Du H. Embedding of ultra-dispersed MoS₂ nanosheets in N, O heteroatom-modified carbon nanofibers for improved adsorption of Hg²⁺. *Composites Communications*. 2022 Apr 1;31:101106.
- 26-Suresha S, Sridhara BK. Wear characteristics of hybrid aluminium matrix composites reinforced with graphite and silicon carbide particulates. *Composites science and Technology*. 2010 Oct 15;70(11):1652-9.
- 27-Campbell FC. Chapter 2-Fibers and reinforcements: The string that provides the strength. *Manufacturing Processes for Advanced Composites*. 2004:39-62.
- 28-Singh JP, Bansal NP, Bhalla AS, Mahmoud MM, Manjooran NJ, Singh G, Lamon J, Choi SR, Pickrell G, Lu K, Brennecke G, editors. *Processing and properties of advanced ceramics and composites VI*. John Wiley & Sons; 2014 Sep 15.
- 29-Adivi HG, Ebrahimzadeh I, Hadi M, Tayebi M. The effect of alumina nanoparticles addition on high-temperature wear behavior of intermetallic iron aluminide produced by the spark plasma sintering process. *Surface Review and Letters*. 2020 Nov 25;27(11):2050004.
- 30-Baradeswaran A, Perumal AE. Study on mechanical and wear properties of Al 7075/Al₂O₃/graphite hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*. 2014 Jan 1;56:464-71.
- 2-Eriksson M, Lord J, Jacobson S. Wear and contact conditions of brake pads: dynamical in situ studies of pad on glass. *Wear*. 2001 May 1;249(3-4):272-8.
- 3-Blau PJ. Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives. Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States); 2001 Oct 22.
- 4-Zhong Y, Xie J, Chen Y, Yin L, He P, Lu W. Microstructure and mechanical properties of micro laser welding NiTiNb/Ti6Al4V dissimilar alloys lap joints with nickel interlayer. *Materials Letters*. 2022 Jan 1;306:130896.
- 5-Zhang P, Zhang L, Wei D, Wu P, Cao J, Shijia C, Qu X. A high-performance copper-based brake pad for high-speed railway trains and its surface substance evolution and wear mechanism at high temperature. *Wear*. 2020 Mar 15;444:203182.
- 6-Kheradmand AB, Tayebi M, Lalegani Z. Design of Fe-SiC-Cu-G Composite Alloy and Optimization of Graphite Contribution for High Sliding Speed Applications. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2022 Sep;75(9):2311-22
- 7-Jang H, Ko KH, Kim SJ, Basch RH, Fash JW. The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials. *Wear*. 2004 Feb 1;256(3-4):406-14.
- 8-Eriksson M, Bergman F, Jacobson S. Surface characterisation of brake pads after running under silent and squealing conditions. *Wear*. 1999 Oct 1;232(2):163-7.
- 9-Eriksson M, Jacobson S. Tribological surfaces of organic brake pads. *Tribology international*. 2000 Dec 1;33(12):817-27.
- 10-Kennedy FE, Balbahadur AC, Lashmore DS. The friction and wear of Cu-based silicon carbide particulate metaal matrix composites for brake applications. *Wear*. 1997 Mar 1;203:715-21.
- 11-Cho MH, Kim SJ, Basch RH, Fash JW, Jang H. Tribological study of gray cast iron with automotive brake linings: The effect of rotor microstructure. *Tribology International*. 2003 Jul 1;36(7):537-45.
- 12-Howell GJ, Ball A. Dry sliding wear of particulate-reinforced aluminum alloys against automobile friction materials. *Wear*. 1995 Feb 1;181:379-90.
- 13-Filip P, Weiss Z, Rafaja D. On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake applications. *Wear*. 2002 Feb 1;252(3-4):189-98.
- 14-Zamani J, Shokuhfar A, Pasbakhsh P. A Comparison Between the Ablation, Thermal and Micro-Structural Properties of Resole Matrix Composites Reinforced with Various Reinforcements. *Modares Mechanical Engineering*. 2008 Oct 10;8(1):47-58.
- 15-Damavandi E, Nourouzi S, Rabiee SM. Effect of porosity on microstructure and mechanical properties of Al₂O₃ (p)/Al-A356 MMC. *Modares Mechanical Engineering*. 2015 May 10;15(3):243-50(in persian).
- 16-Mosallae M. Improvement of wearing property of Al/(SiC+ BNh) surface hybrid composite fabricated by friction stir processing. *Modares Mechanical Engineering*. 2017 Nov 10;17(9):381-9 (in persian).

- 45-Zhang Y, Li C, Ji H, Yang X, Yang M, Jia D, Zhang X, Li R, Wang J. Analysis of grinding mechanics and improved predictive force model based on material-removal and plastic-stacking mechanisms. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2017 Nov 1;122:81-97.
- 46-Bagheri Kazemabadi S, Khavandi A, Kharazi Y. Investigation of the effect of steel fibers and their combination with basalt fibers on the wear and erosion behavior of asbestos-free brake pads. *Int J Ind Eng Prod Manag*. 2007;18(4):87-92 (in persian).
- 47-Rinawa ML, Sharma R, Baviskar PR, Sampathkumar R, Deshmukh RG, Rao MV, Subbiah R. Study on wear properties of Aluminium alloy for different mass of SiC particles. *Materials Today: Proceedings*. 2022 Jan 1;62:5218-22.
- 48-Nassar A, Salem M, El-Batanony I, Nassar E. Improving wear resistance of epoxy/SiC composite using a modified apparatus. *Polymers and Polymer Composites*. 2021 Nov;29(9_suppl):S389-99.
- 49-Bettge D, Starcevic J. Topographic properties of the contact zones of wear surfaces in disc brakes. *Wear*. 2003 Feb 1;254(3-4):195-202.
- 31-Prabhu TR, Varma VK, Vedantam S. Effect of reinforcement type, size, and volume fraction on the tribological behavior of Fe matrix composites at high sliding speed conditions. *Wear*. 2014 Jan 15;309(1-2):247-55.
- 32-Asif M, Chandra K, Misra PS. Mechanical properties of powder based steel used as backing plate in heavy duty brake pad manufacturing. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 2012 May 18;11(5):509-18.
- 33-Shi, T. Lan, Y. Hu, Z. Wang, H. Xu, J. Zheng, B. Tensile and Fracture Properties of Silicon Carbide Whisker-Modified
- 34-Abdelkawy A, El-Danaf EA, Almajid A. The Effect of Alloying, Processing and Heat Treatment on the Wear Resistance of Al-Cu-Mg-Ag Alloys. *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*. 2023 Jun 1;17(2)
- 35-Institute of Standards and Industrial Research of Iran. Brake pad specifications. Standard No. 586.
- 36-Cement-Based Materials. *Int. J. Concr. Struct. Mater*. 2022, 16, 2
- 37-Gopal P, Dharani LR, Blum FD. Load, speed and temperature sensitivities of a carbon-fiber-reinforced phenolic friction material. *Wear*. 1995 Mar 1;181:913-21.
- 38-De Oliveira LJ, Paranhos RD, Guimarães RD, Bobrovnitchii GS, Filgueira M. Use of PM Fe-Cu-SiC composites as bonding matrix for diamond tools. *Powder metallurgy*. 2007 Jun 1;50(2):148-52.
- 39-Yang M, Li C, Zhang Y, Jia D, Li R, Hou Y, Cao H, Wang J. Predictive model for minimum chip thickness and size effect in single diamond grain grinding of zirconia ceramics under different lubricating conditions. *Ceramics International*. 2019 Aug 15;45(12):14908-20.
- 40-Zhang Y, Li HN, Li C, Huang C, Ali HM, Xu X, Mao C, Ding W, Cui X, Yang M, Yu T. Nano-enhanced biolubricant in sustainable manufacturing: from processability to mechanisms. *Friction*. 2022 Jun;10(6):803-41.
- 41-Xin CU, Changhe LI, Wenfeng DI, Yun CH, Cong MA, Xuefeng XU, Bo LI, Dazhong WA, Li HN, Zhang Y, Zafar SA. Minimum quantity lubrication machining of aeronautical materials using carbon group nanolubricant: from mechanisms to application. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2022 Nov 1;35(11):85-112.
- 42-Liu M, Li C, Zhang Y, An Q, Yang M, Gao T, Mao C, Liu B, Cao H, Xu X, Said Z. Cryogenic minimum quantity lubrication machining: from mechanism to application. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2021 Dec;16(4):649-97.
- 43-Kheradmand AB, Fattahi MR, Tayebi M, Hamawandi B. Tribological characterization of reinforced Fe matrix composites with hybrid reinforcement of C, Cu, and SiC particulates. *Crystals*. 2022 Apr 24;12(5):598.
- 44-Yang M, Li C, Zhang Y, Jia D, Zhang X, Hou Y, Li R, Wang J. Maximum undeformed equivalent chip thickness for ductile-brittle transition of zirconia ceramics under different lubrication conditions. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2017 Nov 1;122:55-65.