

Research Paper

Production and Characterization of Aluminum Matrix Composite Reinforced with Mo₂C Particles via Vortex Casting Process

Seyed Mahdi Karamouz^{1*}, Erfan Mehdipour Rabori¹

1- Master's in Materials Engineering and Metallurgy, Department of Materials Engineering and Metallurgy, Shahid Bahonar University of Kerman, Faculty of Engineering, Kerman, Iran

Received: 2025/02/04

Accepted: 2025/05/01

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.71905/jnm.2025.1198640](https://doi.org/10.71905/jnm.2025.1198640)**Keywords:**

Metal matrix composite, aluminum, Mo₂C, wear, centrifugal casting

Abstract

Introduction: With the advancement of industry, the demand for engineering materials with suitable mechanical and tribological properties at low cost has increased. Metal matrix composites, especially aluminum-based, have gained attention in various industries due to their high strength and low production cost. These composites are produced using methods such as vortex casting. Several studies have examined the effect of reinforcing particles on their mechanical properties. In this study, aluminum-molybdenum carbide composite was produced and characterized, and the optimum amount of Mo₂C particles was investigated.

Methods: The aluminum-molybdenum carbide composite was produced by vortex casting. Pure aluminum (99.8%) was melted at 850°C, and Mo₂C powders (99%) were added to the molten metal after drying. To prevent contamination, the stirring blades were coated with nickel to avoid iron (Fe) contamination. Stirring was performed at a speed of 200 RPM for 15 minutes. Samples with 0, 1, 3, 5, and 10 weight percent reinforcement were prepared and analyzed using XRD, FESEM, hardness testing, tensile testing, and pin-on-disk wear testing.

Findings: XRD analysis revealed that the main phases of the Al – 5% Mo₂C composite included Al and Mo₂C. The presence of Mo₂C peaks indicated no formation of undesirable intermetallic compounds. Electron microscope images showed that the addition of Mo₂C resulted in changes in morphology and grain size reduction. A uniform distribution of Mo₂C was observed at 5 weight percent, but at 10 weight percent, agglomeration occurred, reducing mechanical properties. Good adhesion between the reinforcing particles and the aluminum matrix was observed. Hardness and tensile strength increased up to 5 weight percent Mo₂C, but decreased at 10 weight percent due to agglomeration. Increasing Mo₂C led to a decrease in formability.

Citation: Karamouz Seyed Mahdi, Mehdipour Rabori Erfan. Production and Characterization of Aluminum Matrix Composite Reinforced with Mo₂C Particles via Vortex Casting Process. Journal of New Materials; 2024. 15(57):13-27

Corresponding author: Seyed Mahdi Karamouz

Address: Shahid Bahonar University of Kerman, Faculty of Engineering, Department of Materials Engineering and Metallurgy, Kerman, Iran.

Tell: +989337335195

Email: mkaramouz5@gmail.com

Extended Abstract

Introduction:

With industrial advancements, the demand for materials with desirable mechanical and tribological properties at a lower cost has increased. This need has led to the development of engineered composites, particularly Metal Matrix Composites (MMCs). Among these materials, aluminum matrix composites have gained significant attention due to their high strength-to-weight ratio, excellent tribological properties, and lower production costs, making them widely used in aerospace and automotive industries. Various reinforcing particles, such as graphene, carbon nanotubes, silicon carbide, and titanium carbide, are used to enhance the properties of these composites.

One of the most common manufacturing methods for these materials is stir casting, which is favored due to its simplicity, low cost, and suitability for mass production. However, challenges such as porosity, particle agglomeration, and poor wettability between the reinforcement and the matrix remain key issues. Research has shown that selecting the right type and amount of reinforcing particles significantly improves strength, hardness, and mechanical performance. In this study, aluminum matrix composites reinforced with molybdenum carbide (Mo₂C) were produced using the stir casting method to determine the optimal Mo₂C particle content for enhancing mechanical, tribological, and electrochemical properties.

Findings and Discussion

The XRD analysis showed that the Al-5% Mo₂C composite contains only aluminum and molybdenum carbide phases, without unwanted intermetallic compounds. Adding 5% Mo₂C resulted in a uniform particle distribution and smaller grain size, improving mechanical properties. However, at 10%, Mo₂C particles

agglomerated, weakening the composite. The bonding between Mo₂C and aluminum enhanced hardness and tensile strength at 5%, but excessive Mo₂C reduced these properties and formability. In summary, Mo₂C improves mechanical properties, but excessive amounts may have a negative effect.

Conclusion

The results showed that the production of Mo₂C reinforced aluminum composites through stir casting is feasible. The best composition was Al-5% Mo₂C, which led to improvements in hardness, tensile strength, and wear resistance. At 3 wt% Mo₂C, the particles enhanced the tensile strength by 64% and the hardness by 80% compared to the pure aluminum sample, by locking dislocations and inhibiting grain growth during solidification. Increasing the Mo₂C content beyond 5 wt% resulted in particle agglomeration and deterioration of properties. Specifically, the tensile strength decreased by 3% and the hardness by 5% compared to the sample reinforced with 3 wt% Mo₂C. Mo₂C particles contributed to the enhancement of engineering properties by preventing grain growth and locking dislocations.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Design experiments and perform:

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

تولید و مشخصه‌یابی کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با ذرات Mo_2C توسط فرآیند ریخته‌گری گردابی

سید مهدی کارآموز^{*}، عرفان مهدی‌پور رابری^۱

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی مهندسی، کرمان، ایران

چکیده

مقدمه: با پیشرفت صنعت، نیاز به مواد مهندسی با خواص مکانیکی و تریبولوژیکی مناسب و هزینه کم افزایش یافته است. کامپوزیت‌های زمینه فلزی، به‌ویژه آلومینیومی، به دلیل استحکام بالا و هزینه تولید کم، در صنایع مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند. این کامپوزیت‌ها با روش‌هایی مانند ریخته‌گری گردابی تولید می‌شوند. پژوهش‌های متعددی تأثیر ذرات تقویت‌کننده بر خواص مکانیکی آن‌ها را بررسی کرده‌اند. در این تحقیق، کامپوزیت آلومینیوم-کاربید مولیبدن تولید و مشخصه‌یابی شده و بهینه‌ترین مقدار ذرات Mo_2C بررسی شده است.

روش: کامپوزیت آلومینیوم-کاربید مولیبدن به روش ریخته‌گری گردابی تولید شد. آلومینیوم خالص (۹۹٫۸٪) در ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد ذوب و پودرهای Mo_2C (۹۹٪) پس از خشک شدن به مذاب اضافه شدند. برای جلوگیری از آلودگی، پره‌های همزن با پوشش نیکل پوشانده شدند تا از ورود آهن (Fe) به مذاب جلوگیری شود. همزدن با سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه و به مدت ۱۵ دقیقه انجام شد. نمونه‌هایی با ۱، ۳، ۵ و ۱۰ درصد وزنی تقویت‌کننده تهیه و با روش‌های XRD، FESEM، سختی‌سنجی، کشش و سایش پین روی دیسک بررسی شدند.

یافته‌ها: آنالیز XRD نشان داد که فازهای اصلی کامپوزیت $\text{Al} - 5\% \text{Mo}_2\text{C}$ شامل Al و Mo_2C هستند. حضور پیک‌های Mo_2C نشان‌دهنده عدم تشکیل ترکیبات بین‌فلزی ناخواسته است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان دادند که افزودن Mo_2C موجب تغییر مورفولوژی و کاهش اندازه دانه‌ها می‌شود. در ۵ درصد وزنی Mo_2C توزیع یکنواختی مشاهده شد، اما در ۱۰ درصد وزنی، پدیده توده‌ای شدن (کلوخه‌سازی) رخ داد که خواص مکانیکی را کاهش داد. چسبندگی خوب ذرات تقویت‌کننده با زمینه آلومینیومی مشاهده شد. سختی و استحکام کششی تا ۵ درصد وزنی Mo_2C افزایش یافت، اما در ۱۰ درصد وزنی کاهش یافت که ناشی از کلوخه‌سازی بود. افزایش Mo_2C باعث کاهش شکل‌پذیری شد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که تولید کامپوزیت آلومینیوم تقویت‌شده با Mo_2C از طریق ریخته‌گری گردابی ممکن است. بهترین ترکیب $\text{Al} - 5\% \text{Mo}_2\text{C}$ بود که باعث بهبود خواص سختی، کشش و سایش شد. ذرات Mo_2C در ۳ درصد وزنی با قفل کردن نابه‌جایی‌ها و ممانعت از رشد دانه‌ها در حین انجماد، منجر به بهبود استحکام کششی به اندازه ۶۴ درصد و سختی به اندازه ۸۰ درصد نسبت به نمونه خالص شد. افزایش میزان Mo_2C بیش از ۵ درصد وزنی موجب کلوخه‌سازی و تضعیف خواص شد. به این صورت که استحکام کششی را به اندازه ۳ درصد و سختی را به اندازه ۵ درصد نسبت به نمونه تقویت شده با ۳ درصد وزنی تضعیف نمود. ذرات Mo_2C با جلوگیری از رشد دانه‌ها و قفل کردن نابه‌جایی‌ها، بهبود خواص مهندسی را سبب شدند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۱

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.71905/jnm.2025.1198640](https://doi.org/10.71905/jnm.2025.1198640)

واژه‌های کلیدی:

کامپوزیت زمینه فلزی، آلومینیوم، Mo_2C ، سایش، ریخته‌گری گردابی

* نویسنده مسئول: سید مهدی کارآموز

نشانی: دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی مهندسی، بخش مهندسی مواد و متالورژی، کرمان، ایران

تلفن: ۰۹۳۳۳۳۳۵۱۹۵

پست الکترونیکی: mkaramouz5@gmail.com

مقدمه

با توجه به پیشرفت‌های روز افزون صنعت امروزی در چند سال اخیر، نیاز جهانی به موادی با خواص مکانیکی و تریبولوژیکی مطلوب با قیمت اقتصادی کمتر، پررنگ‌تر شده است. نیاز به این دسته از مواد مهندسی منجر به تولید کامپوزیت‌ها شد. کامپوزیت‌ها انواع مختلفی دارند که یکی از مهم‌ترین دسته‌های کامپوزیت‌ها، کامپوزیت‌های زمینه فلزی (Metal Matrix Composites یا MMC) است. از مهم‌ترین کامپوزیت‌های زمینه فلزی می‌توان به کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم اشاره کرد. کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، خواص تریبولوژیکی مطلوب و هزینه‌های تولید کمتر نسبت به سایر کامپوزیت‌های زمینه فلزی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. این دسته از مواد مهندسی در زمینه‌های بسیاری مانند صنایع هوافضا و صنایع خودروسازی، تولید تجهیزات ورزشی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱). کامپوزیت‌ها از دو جزء اصلی تشکیل شده‌اند: زمینه و تقویت‌کننده. زمینه یک جزء پیوسته و همگن است که شکل کلی قطعه را تشکیل می‌دهد، ذرات تقویت‌کننده را به هم متصل می‌کند و تنش را به آن‌ها منتقل می‌کند. فاز تقویت‌کننده به اشکال مختلف (رشته‌های بلند یا پیوسته، رشته‌های کوتاه یا غیرپیوسته، ویسکرها و ذرات) در زمینه گنجانده می‌شود و خواص کامپوزیت را بهبود می‌بخشد (۲). بیسواس و همکاران، تکنیک متالورژی مایع را روشی اقتصادی برای تولید آلیاژها و کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم معرفی کرده‌اند که طی دهه اخیر پیشرفت‌های قابل توجهی داشته است. در این تحقیق، روش‌های ریخته‌گری مداوم و گردابی به عنوان مؤثرترین تکنیک‌ها برای تولید این مواد بررسی شده‌اند (۳). ذرات بسیاری می‌توانند در تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم مورد استفاده قرار بگیرند که از این میان می‌توان به ذرات کربنی مانند گرافین، گرافیت و نانولوله‌های کربنی و سائز ذرات سرامیکی مانند کاربید سیلیسیم، کاربید تیتانیوم و ... اشاره کرد (۴). روش‌های مختلفی برای تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم وجود دارد که می‌توانند بسته به خواص مورد نظر روش مناسبی را برگزید. به صورت کلی فرآیندهای تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی را می‌توان در سه دسته اصلی روش‌های حالت مایع، جامد و گاز تقسیم‌بندی کرد (۵). رایج‌ترین دسته از روش‌های تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی روش‌های حالت مایع می‌باشد که مرسوم‌ترین این روش‌ها ریخته‌گری گردابی می‌باشد. مکانیزم کلی در این روش به این صورت است که به مذاب در حال مخلوط شدن ذره تقویت‌کننده افزوده می‌شود (۶). از میان انبوه روش‌های

تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی روش ریخته‌گری گردابی یکی از روش‌های رایج می‌باشد که این روش به صورت تجاری درآمده است. از مزایای این روش می‌توان به سادگی، امکان تولید قطعات در تیراژ بالا و انعطاف پذیری روش اشاره نمود. از دیگر مزایای این روش می‌توان به این موضوع اشاره کرد که این فرآیند بر اساس یک روش سنتی و کم هزینه قدیمی (ریخته‌گری) استوار است که باعث شده است بسیاری از هزینه‌های تولید کاهش پیدا کند. این فرآیند یکی از کم هزینه‌ترین روش‌های تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی در میان انبوه روش‌های تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی است (۷). طبق گزارش‌های ارائه شده در ارتباط با این روش می‌توان گفت که هزینه تولید در این روش تقریباً یک سوم تا نصف هزینه تولید روش‌های دیگر است، که این مقدار در تولید انبوه به مقدار یک دهم می‌رسد (۸). چالش‌های بسیاری در تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی وجود دارد که در صورت مرتفع سازی این چالش‌ها خواص مهندسی کامپوزیت تولید شده بهبود چشم‌گیری می‌تواند داشته باشد. از جمله چالش‌های بحث برانگیز در بحث تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم می‌تواند به تخلخل، کلوخه‌سازی^۱ ذرات تقویت‌کننده، وقوع واکنش‌های ناخواسته میان ذرات تقویت‌کننده و زمینه و ترشوندگی ضعیف میان تقویت‌کننده و زمینه اشاره کرد. بروز هر یک از این موارد می‌تواند منجر به تخریب خواص مکانیکی و تریبولوژیکی کامپوزیت تولید شده شوند (۷، ۹-۱۶).

پژوهش‌های متعددی در خصوص مطالعه تاثیر انواع ذرات تقویت‌کننده بر خواص مهندسی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم صورت گرفته است. طبق گزارش ارائه شده در مقاله مروری (۱۷) افزودن ذرات B_4C ، SiC ، Al_2O_3 در مذاب آلومینیوم منجر به افزایش سختی، استحکام کششی و در ضمن کاهش شکل‌پذیری می‌گردد. مشخص شده است که افزودن گرافیت در آلومینیوم منجر به بهبود استحکام کششی و مدول الاستیک می‌شود در حالیکه همین موضوع باعث کاهش سختی می‌گردد. همچنین حضور گرافیت منجر به کاهش ضریب اصطکاک نیز می‌گردد. به صورت کلی تقویت‌کننده‌های ارگانیک همچون خاکستر نارگیل، خاکستر پوسته برنج منجر به بهبود خواص مکانیکی و تریبولوژیکی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم می‌شوند.

شهریاری و همکاران از روش ریخته‌گری گردابی به منظور افزایش ترشوندگی ذرات سرامیکی در کامپوزیت با زمینه آلومینیوم استفاده نمودند. نتایج این مطالعه حاکی از آن بود که با افزودن نانوذرات تقویت‌کننده و همچنین منیزیم (Mg)، میزان تخلخل

افزایش یافت. با این حال، نتایج نهایی نشان دادند که افزودن مقادیر بهینه از آلومینا (Al_2O_3)، مس (Cu) و منیزیم (Mg) منجر به افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی گردید (۱۸).

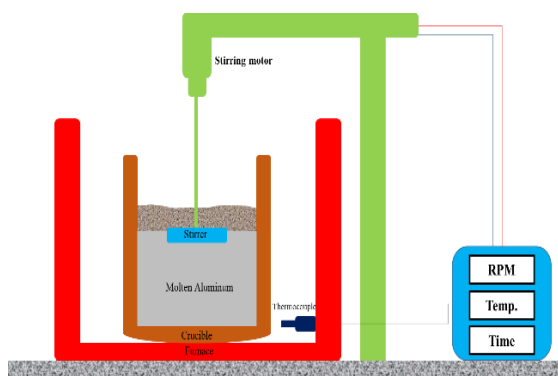
فورژان و همکاران یک تحلیل تجربی بر روی خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 تقویت شده با ذرات SiC در سه اندازه مختلف نانومتری، زیرمیکرونی و میکرونی انجام دادند. این کامپوزیت‌ها با استفاده از روش ریخته‌گری گردابی تولید شدند. نتایج نشان داد که به طور کلی، افزودن ذرات تقویت کننده به آلومینیوم منجر به افزایش مقاومت کششی نهایی می‌شود. ذرات در مقیاس نانو تأثیر به مراتب بیشتری بر مقاومت کششی ساختار کامپوزیتی نشان می‌دهند (۱۹).

گارماتیا و همکاران نشان دادند که کامپوزیت‌های زمینه فلزی A7075 با استفاده از روش متالورژی مذاب و ریخته‌گری همزنی تولید می‌شوند و افزودن تقویت کننده‌های میکرو و نانو سبب بهبود ریزساختار، خواص مکانیکی و سایشی این کامپوزیت‌ها شده است. همچنین، استفاده از نانوذرات و تقویت کننده‌های هیبریدی منجر به عملکرد بهتر مکانیکی و تریبولوژیکی این مواد شده است (۲۰). چن و همکارانش (۲۱) کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با ذرات TiB_2 را به روش ریخته‌گری تولید و مشخصه‌یابی کردند. پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش، مقدار ذرات تقویت کننده، مدت زمان نگهداری مذاب و سرعت همزدن مذاب بود. نتایج این پژوهش نشان داد که در صورت استفاده از ۵ درصد وزنی ذرات تقویت کننده، خواص مهندسی نمونه‌ها در بهینه‌ترین حالت ممکن قرار دارد. لای و همکارانش (۲۲) کامپوزیت زمینه آلومینی با ذرات TiB_2 را به روش درجا تولید و مشخصه‌یابی کردند. در این پژوهش پودرهای Ti و B با نسبت‌های استوکیومتری مناسبی با یکدیگر مخلوط شده و به مذاب آلومینیوم اضافه شدند. جهت انجام واکنش میان ذرات و تولید ذره تقویت کننده نهایی، از تزریق گاز آرگون توسط لوله سرمایی به داخل مذاب استفاده شد. با توجه به نتایج ارائه شده در این پژوهش ذرات تقویت کننده با اندازه‌های ۱ تا ۳ میکرومتر در داخل زمینه پراکنده شدند. حضور این ذرات باعث بهبود رفتار مکانیکی کامپوزیت شد. به این صورت که در بهینه‌ترین حالت ممکن استحکام کششی به اندازه ۶۱٪ و استحکام تسلیم ۵۸٪ بهبود پیدا کرده بود. در کنار بهبود خواص مکانیکی، انعطاف پذیری نمونه‌ها به مقدار ۵۸٪ کاهش پیدا کرده بود. لیکاتو و همکارانش (۲۳) با استفاده از آلیاژ ۱۰۵۰ آلومینیوم کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با ذرات WC و TiC را با استفاده از روش ریخته‌گری تولید و مشخصه‌یابی کردند. آن‌ها اثر نمک K_2TiF_6 را به عنوان عامل ترشونده بررسی کرده و خواص ریزساختاری و

سایشی کامپوزیت‌های تولید شده را مورد ارزیابی قرار دادند. شیر و همکارانش (۲۴) کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با ذرات منیزیم را به روش ریخته‌گری گریز از مرکز تولید و مشخصه‌یابی نمودند. رفتار مکانیکی کامپوزیت توسط آزمون سختی سنجی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که در صورت استفاده از ۶ درصد ذرات تقویت کننده، میزان سختی نمونه‌های کامپوزیتی در بهینه‌ترین حالت ممکن قرار دارد. راجان و همکارانش (۲۵) کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با ذرات کاربید سیلیسیم را به روش ریخته‌گری گریز از مرکز به روش گردانی تولید و مشخصه‌یابی کردند. در این پژوهش غلظت‌های مختلفی از SiC در کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت و گردانی از غلظت ذرات تقویت کننده در کامپوزیت ایجاد شد. بر اساس گزارشات ارائه شده در مقاله مشخص شد که مقدار سختی در نواحی که غلظت SiC بیشتر می‌باشد، بالاتر است. این در حالی بود که با پیش روی به سمت مرکز نمونه، سختی کاهش پیدا کرده و خواص مکانیکی تضعیف می‌شد. آماناس و همکارانش (۳) کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با ذرات TiC را به روش ریخته‌گری تولید و مشخصه‌یابی کردند. پارامتر مورد بررسی در این پژوهش مقدار ذرات تقویت کننده بود. نتایج این بررسی نشان داد که خواص مکانیکی و تریبولوژیکی نمونه‌های تقویت شده با ذرات کاربید تیتانیوم خواص مکانیکی و خواص سایشی مطلوب‌تری از خود نشان دادند. نتایج این بررسی نشان داد که خواص سایشی کامپوزیت‌ها ی زمینه آلومینیوم تقویت شده با ذرات TiC نسبت به آلومینیوم خالص ۶۰ درصد نرخ سایش کمتری داشته است.

با توجه به مطالعات صورت گرفته و موارد ارائه شده در این قسمت مشاهده می‌شود که بحث مقاومت به سایش و خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها ی زمینه آلومینیومی بسیار حائز اهمیت است. با توجه به این مهم که بهبود خواص مکانیکی و خواص سایشی نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از ذرات کاربید مولیبدن بررسی نشده است در این پژوهش بهبود خواص مکانیکی و سایشی با استفاده از کاربید مولیبدن بررسی شده است.

در این پژوهش کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با ذرات کاربید مولیبدن (Mo_2C) به روش ریخته‌گری گردابی تولید و مشخصه‌یابی شده است. دلیل استفاده از ذرات کاربید مولیبدن در این پژوهش بحث بهبود خواص سایشی به دلیل حضور ذرات کاربید مولیبدن می‌باشد. به عبارتی نوآوری در این تحقیق استفاده از ذره خود روانکار مانند کاربید مولیبدن می‌باشد. پارامتر مورد بررسی در این پژوهش، مقدار ذرات تقویت کننده می‌باشد. هدف دست‌یابی به بهینه‌ترین مقدار ذرات Mo_2C در مذاب آلومینیوم است. به منظور ارزیابی خواص کامپوزیت‌های تولید شده، در کنار



شکل ۱- شماتیک تجهیزات نصب شده جهت تولید نمونه‌ها
نام‌گذاری نمونه‌ها بر اساس جدول ۲ انجام شده است.

جدول ۲- نام‌گذاری نمونه‌ها

عنوان نمونه	درصد وزنی ذرات Mo ₂ C	درصد حجمی ذرات Mo ₂ C
Al - 0 % Mo ₂ C	۰	۰
Al - 1 % Mo ₂ C	۱	۰/۲۶
Al - 3 % Mo ₂ C	۳	۰/۷۸
Al - 5 % Mo ₂ C	۵	۱/۲۹
Al - 10 % Mo ₂ C	۱۰	۲/۵۸

۲- مشخصه‌یابی نمونه‌ها

به منظور مطالعه فازهای موجود در کامپوزیت‌های تولید شده از پراش اشعه ایکس (XRD) استفاده شد. دستگاه مورد استفاده Empyrean، با Cu - K α می‌باشد که radiation operated، at 40 kV and 40 mA می‌باشد. جهت مطالعه ریزساختار، نمونه‌ها تا از سنبله ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ سنبله زنی شدند و سپس توسط نمد و پودر آلومینا (در مقیاس میکرومتر) به مدت ۱۰ دقیقه پولیش شدند. در نهایت جهت تصویربرداری از دستگاه FESEM مدل 3 - MIRA استفاده شد.

به منظور مطالعه رفتار مکانیکی نمونه‌ها از آزمون‌های سختی سنجی و کشش استفاده شده است. آزمون سختی سنجی با استفاده از دستگاه میکرو سختی سنج ویکرز بر اساس استاندارد ASTM E 384 صورت گرفت. برای تهیه نمونه برای انجام آزمون سختی سنجی، نمونه ریخته‌گری شده از وسط به صورت مقطع عرضی برش داده شد و سختی سطح مقطع بررسی شد. به عبارتی سختی وسط نمونه ریخته‌گری شده بررسی شد. برای رسم پروفیل تغییرات سختی از سطح به مرکز نمونه، سختی سطح مقطع از سطح به مرکز با فواصل ۱ سانتی‌متری بررسی شد. نمونه‌های مورد آزمایش برای آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM E8M - 04 تهیه شدند. جهت بررسی رفتار کششی نمونه‌ها از دستگاه تست کشش مدل STM-40 استفاده شد. نمونه‌ها با سرعت ۰/۰۵ میلی‌متر بر ثانیه تحت کشش قرار

آنالیزهای فازی و ریزساختاری، از آزمون‌های خواص مکانیکی، تریبولوژیکی و الکتروشیمیایی نیز استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

۱- تولید نمونه‌ها

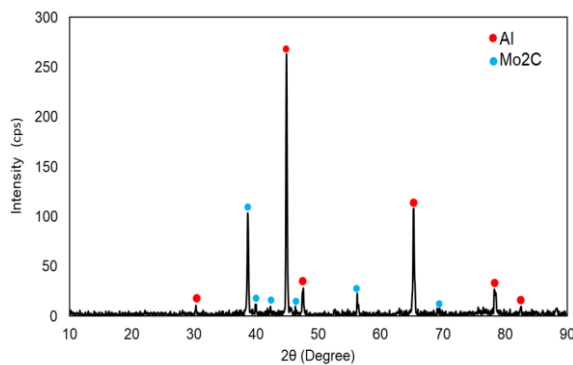
کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با ذرات Mo₂C با استفاده از روش ریخته‌گری گردابی تولید و مشخصه‌یابی شد. مشخصات فیزیکی ذرات فاز تقویت کننده در جدول شماره ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی ذرات فاز تقویت کننده (Mo₂C)

مشخصه	مقدار
چگالی (g/cm ³)	۸/۹۰
سختی (GPa)	۱۷/۸۶
میانگین اندازه ذرات (μ m)	۵-۱
رنگ	خاکستری
دمای ذوب ($^{\circ}$ C)	۲۶۸۷
شرکت تولید کننده	مرک

قالب تهیه شده برای ریخته‌گری نمونه‌های مورد بررسی یک قالب استوانه‌ای از جنس فولاد ساده کربنی به طول ۱۵ سانتی‌متر و قطر داخلی ۷ سانتی‌متر بود. ضخامت دیواره قالب سه سانتی‌متر بود. نمونه‌های مورد استفاده برای انجام مشخصه‌یابی از استوانه‌های ریخته‌گری شده برش داده شدند. آلومینیوم مورد استفاده آلومینیوم خالص ۹۹٫۸٪ بود. ذرات تقویت کننده پودری Mo₂C با خلوص ۹۹٪ مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۱ شماتیک تجهیزات مورد استفاده برای تولید کامپوزیت را نشان می‌دهد. برای هر نمونه ۱/۵ کیلوگرم آلومینیوم در بوته گرافیتی در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد ذوب و به مدت ۳۰ دقیقه نگهداری شد. به منظور رطوبت‌زدایی و ممانعت از تشکیل بخار و بروز ترک در فصل مشترک زمینه و تقویت کننده، پودرهای مورد استفاده به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. پس از افزودن پودرهای تقویت کننده به مذاب، به منظور توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده در مذاب و ممانعت از ته‌نشین شدن ذرات تقویت کننده، با یک همزن چهار پره که پیش گرم شده بود، عمل همزدن مذاب انجام شد. به منظور جلوگیری از ورود عناصر ناخالصی مانند آهن (Fe) به داخل مذاب، پره‌های همزن با پوشش نیکل، پوششش داده شدند.

همزدن مذاب با سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه (RPM) و در مدت زمان ۱۵ دقیقه صورت گرفت. در تمام این مدت دمای مذاب حفظ می‌شد تا انجماد صورت نگیرد. جهت مشاهده تاثیر مقدار ذره تقویت کننده بر خواص کامپوزیت تولید شده، نمونه‌هایی با درصدهای مختلف ذرات تقویت کننده (۰، ۱، ۳، ۵ و ۱۰ درصد وزنی) تولید شدند.

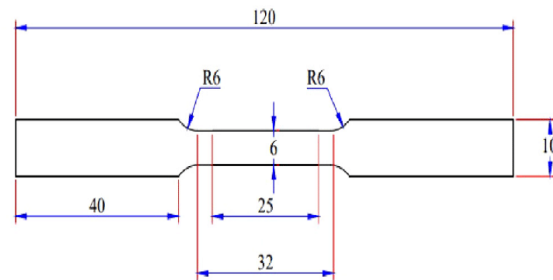


شکل ۳- نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس برای نمونه Al - 5% Mo₂C

۲- ریزساختار

به منظور مطالعه ریزساختار نمونه‌های تولید شده و مشاهده تاثیر حضور ذرات تقویت کننده بر مورفولوژی کامپوزیت‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. نتایج این بررسی در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۳ قسمت الف نتایج ریزساختار نمونه آلومینیوم فاقد ذرات تقویت کننده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که ریزساختار نمونه آلومینیوم خالص منسجم بوده و فاقد ترک، آخال و سایر ناهمگنی‌های ریزساختاری است. سایر تصاویر ارائه شده در این شکل ریزساختاری نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با ذرات کاربید مولیبدن در مقادیر مختلف را نشان می‌دهد. ریزساختار این نمونه‌ها نشان دهنده این مهم می‌باشد که حضور ذرات تقویت کننده در ساختار نمونه آلومینیومی منجر به تغییر در مورفولوژی ریزساختار شده است. مشخص است که علت تفاوت در ریزساختار نمونه کامپوزیتی حضور ذرات کاربید مولیبدن می‌باشد. ممکن است این ذرات به عنوان عوامل جوانه‌زا در فرایند انجماد عمل کرده و باعث می‌شود که اولین هسته‌های انجماد اطراف این ذرات شکل بگیرند. در چنین حالتی ریزساختار نمونه دارای بافت کریستالی ریزتری نسبت به حالت آلومینیوم خالص می‌باشد. بنابراین یکی از دلایل تغییر در مورفولوژی نمونه‌های تقویت شده با ذرات کاربید مولیبدن، ممکن است این ذرات تقویت کننده مانند عامل جوانه‌زا عمل کرده باشد. استفاده از ذرات سرامیکی تقویت کننده تحت عنوان عامل جوانه‌زا در مطالعات دیگری نیز به اثبات رسیده است (۲۷، ۲۸). با توجه به ریزساختار ارائه شده برای نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با ذرات کاربید مولیبدن مشاهده می‌شود که توزیع ذرات تقویت کننده تا مقدار ۵ درصد کاربید مولیبدن، به صورت یکنواختی باشد. این در حالی است که در نمونه تقویت شده با ۱۰ درصد کاربید مولیبدن، پدیده کلوخه‌سازی و توده‌ای شدن ذرات مشاهده شده است. وقوع پدیده توده‌ای شدن می‌تواند بسیاری از خواص مهندسی نمونه‌ها را تغییر داده و ممکن است منجر به تضعیف برخی خواص مهندسی مانند سختی

گرفتند. شکل ۲ ابعاد نمونه کشش را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۲- ابعاد نمونه کشش.

جهت مطالعه رفتار تریبولوژیکی نمونه‌ها از آزمون سایش پین رو دیسک استفاده شد. نمونه مورد استفاده برای آزمون سایش، یک قرص بود که از مقطع عرضی قسمت وسط نمونه‌های استوانه‌ای برش داده شده بود. این آزمون در رطوبت و دمای محیط صورت گرفت. سرعت سایش ۱۲۵/۰ متر بر ثانیه و فاصله سایش ۱۰۰ متر بود. پین مورد استفاده از فولاد سخت کاری شده با سختی ۵۰ راکول سی (HRC) بود.

نتایج

۱- آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD)

به منظور مطالعه و آنالیز فازی کامپوزیت‌های تولید شده از آنالیز پراش اشعه ایکس استفاده شده است.

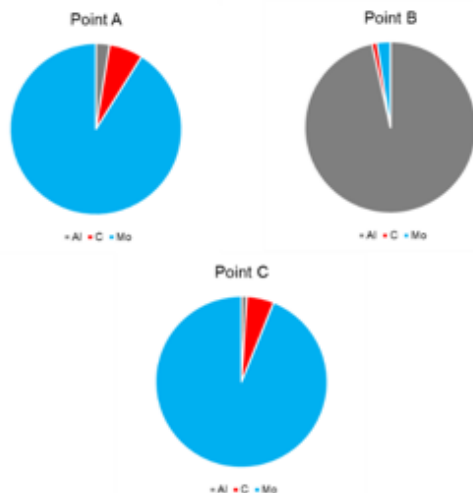
شکل ۳ نتایج آنالیز XRD نمونه Al - 5% Mo₂C را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص است که در این نتایج پیک‌های مربوط به ذره تقویت کننده Mo₂C دیده می‌شود. این پیک نشان دهنده این موضوع می‌باشد که نمونه تولید شده در زمینه آلومینیوم، شامل ذرات تقویت کننده Mo₂C می‌باشد. در ادامه مشخص است که فازهای اصلی تشکیل شده مربوط به فاز Mo₂C و Al می‌باشد. با توجه به زمینه آلومینیومی مورد استفاده در این پژوهش، حضور پیک اصلی Al به دور از انتظار نمی‌باشد. حضور پیک اصلی Mo₂C و عدم مشاهده هیچ پیک دیگری مبنی بر تشکیل ترکیبات بین‌فلزی می‌تواند بیانگر این مهم باشد که واکنش ناخواسته‌ای میان ذرات تقویت کننده و زمینه آلومینیومی صورت نگرفته است. وجود فازهای بین فلزی در ریزساختار کامپوزیت‌ها ی زمینه فلزی منجر به تضعیف خواص مکانیکی و تریبولوژیکی نمونه‌ها می‌شوند (۲۶). شایان ذکر است که ممکن است برخی فازهای ناخواسته در مقادیر کمتر از ۵ درصد حضور داشته باشند که آنالیز XRD قادر به مشاهده آن‌ها نمی‌باشد.

و استحکام شود. علت توده‌ای شدن ذرات کاربید مولیبدن می‌تواند مقدار بیش از حد ذرات، عدم ایجاد تلاطم کافی به منظور توزیع یکنواختی یا وزن کاربید مولیبدن باشد. ذرات کاربید مولیبدن به دلیل چگالی بالاتر نسبت به آلومینیوم ممکن است در قسمت انتهایی قالب ته نشین شده و در آن قسمت توده‌ای بشوند. توده‌ای شدن ذرات تقویت کننده در یک نقطه از زمینه آلومینیوم منجر به تمرکز تنش در آن قسمت شده و خواص مکانیکی کامپوزیت در قسمتی از زمینه که در آن توده‌ای شدن رخ داده است، به صورت چشم‌گیری تضعیف می‌شود. به منظور ممانعت از بروز پدیده کلوخه‌سازی دستورالعمل‌های خاصی در مقالات مختلف ارائه شده است. چن و همکارانش (۲۹) در تولید کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با ذرات TiC به منظور ممانعت از بروز پدیده کلوخه‌سازی از فرآیند ریخته‌گری گردابی استفاده کردند. بنابراین یکی از فرآیندهای ممانعت از بروز پدیده کلوخه‌سازی ذرات تقویت کننده در ریزساختار کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم استفاده از ریخته‌گری گردابی می‌باشد. در صورت استفاده از این فرآیند تولید، می‌توان کامپوزیت‌هایی با درصد بالاتر ذرات تقویت کننده تولید کرد.

در اغلب پژوهش‌های صورت گرفته علت توده‌ای شدن ذرات تقویت کننده مقدار بیش از حد آن‌ها گزارش شده است که در صورت حضور بیش از حد، با ایجاد پیوندهای مکانیکی میان خود ذرات، توانایی انحلال این توده‌ها در مذاب کاهش پیدا کرده و به صورت یک توده در یک نقطه از مذاب باقی می‌ماند که در نهایت باعث تضعیف خواص مکانیکی و تریبولوژیکی کامپوزیت می‌شوند (۳۰-۳۲). توده‌ای شدن جزء تقویت کننده در زمینه آلومینیوم در مطالعه سجادی و همکارانش نیز تأیید شده است (۳۳).

با مشاهده ریزساختار نمونه‌های کامپوزیتی که در شکل ۴ ارائه شده است، مشاهده می‌شود که در فصل مشترک ذرات کاربید مولیبدن و زمینه ترکی مشاهده نشده است. بنابراین در میان ذرات کاربید مولیبدن و زمینه واکنش‌های ناخواسته‌ای شکل نگرفته است که محصول آن واکنش تشکیل فازهای بین فلزی ترد و ترک باشد. به عبارت بهتر در فصل مشترک زمینه و ذرات کاربید مولیبدن فاز ناخواسته‌ای وجود ندارد. عدم حضور واکنش‌های ناخواسته و عدم مشاهده ترکیبات بین فلزی نشان دهنده چسبندگی ایده‌آل ذرات تقویت کننده به زمینه است. از دیگر دلایل بهبود چسبندگی و اتصال ذرات تقویت کننده به زمینه آلومینیومی بحث ترشوندگی مناسب تقویت کننده و زمینه

می‌باشد. با کاهش زاویه ترشوندگی، اتصال و چسبندگی ذرات تقویت کننده به زمینه بهبود پیدا کرده و در نتیجه ترک‌های مشهودی میان این دو جزء اصلی کامپوزیت پدید نمی‌آید. اوماناس و همکارانش (۳۴) کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات SiC و Al_2O_3 را تولید کردند. در این مقاله ترک‌های مشهودی میان ذرات تقویت کننده زمینه مشاهده شد. بر اساس گزارش ارائه شده در این مقاله دلیل بروز این ترک‌ها ترشوندگی نامناسب ذرات آلومینا و کاربید سیلیسیم در آلومینیوم گزارش شده بود (۳۵، ۳۶). از طرفی مشاهده می‌شود که ذرات تقویت کننده به عنوان عامل جوانه‌زا عمل کرده و باعث تولید ریزساختار با مورفولوژی ریزتری شدند. با توجه به عدم مشاهده ترک و حفره بین ذرات کاربید مولیبدن و زمینه آلومینیوم (به غیر از نمونه تقویت شده با ۱۰ درصد کاربید مولیبدن) اطمینان حاصل می‌شود که زاویه ترشوندگی میان کاربید مولیبدن و زمینه آلومینیومی مقدار ناچیزی بوده و ذرات کاربید مولیبدن به سهولت در داخل مذاب آلومینیوم تر می‌شوند. از ویژگی‌های یک جوانه‌زا مطلوب زاویه ترشوندگی پایین آن با مذاب می‌باشد. بنابراین پیش بینی می‌شود که ذرات کاربید مولیبدن مورد استفاده در این پژوهش می‌توانند جوانه‌زا مناسب برای مذاب آلومینیوم مورد استفاده قرار بگیرند. این جوانه‌زا علاوه بر اینکه باعث بهبود ریزساختار آلومینیوم می‌گردد، باعث تولید یک ساختار کامپوزیتی نیز می‌شود. عدم مشاهده ترک در فصل مشترک ذرات کاربید مولیبدن و زمینه آلومینیوم نشان دهنده بهبود خواص مکانیکی و تریبولوژیکی کامپوزیت‌ها می‌باشد که این موضوع در مقالات دیگر نیز تأیید شده است (۳۲). وجود هر گونه نابه‌هم پیوستگی و حفره در ریزساختار کامپوزیت‌ها می‌تواند منجر به تمرکز تنش و کاهش استحکام مکانیکی کامپوزیت گردد. از طرفی حضور نقاط نوک تیز نیز منجر به بروز پدیده تمرکز تنش شده و در نهایت باعث رشد و اشاعه ترک از این نواحی می‌گردد. باتوجه به نتایج ریزساختار نمونه تقویت شده با ۱۰ درصد ذرات کاربید مولیبدن مشاهده می‌شود که ریزساختار این نمونه دارای ساختار ناپیوسته‌تر و زبرتری نسبت به سایر کامپوزیت‌ها می‌باشد. حضور نقطه نوک تیز و حفرات در ریزساختار کامپوزیت تقویت شده با ۱۰ درصد کاربید مولیبدن، باعث تمرکز تنش و تشدید اشاعه ترک در ریزساختار خواهد شد. این موضوع در پژوهش مولیک و همکارانش (۳۷) نیز تأیید شد. بنابراین انتظار می‌رود خواص مکانیکی این کامپوزیت نسبت به سایر کامپوزیت‌ها در مقادیر کمتری بهبود پیدا کند.



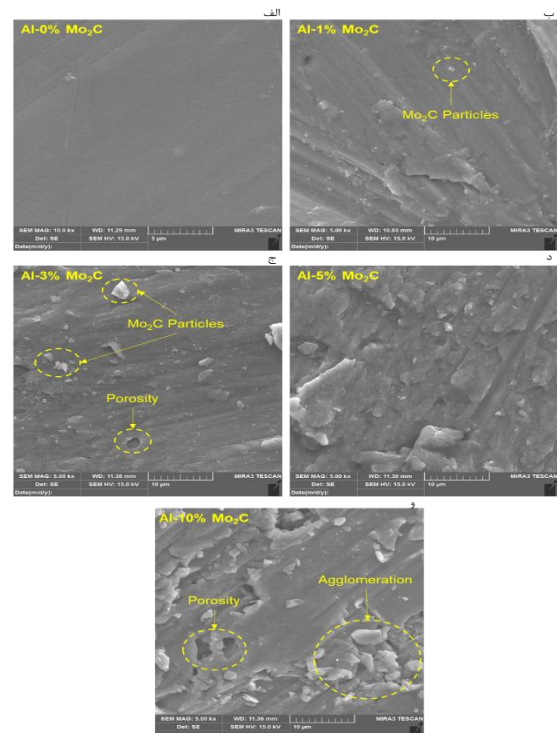
شکل ۵- نتایج آنالیز عنصری نمونه Al – 10% Mo₂C

۳- خواص مکانیکی

۳-۱ سختی سنجی

به منظور ارزیابی خواص مکانیکی نمونه‌های تولید شده از آمون سختی سنجی استفاده شده است. نتایج این ارزیابی در شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به این نتایج مشاهده می‌شود که در حضور ذرات کاربید مولیبدن سختی نمونه‌ها نسبت به آلومینیوم خالص بهبود پیدا کرده است. حضور ذرات کاربید مولیبدن باعث افزایش سختی نمونه‌ها شده است. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش بیشتر ذرات کاربید مولیبدن، سختی نمونه‌ها افزایش بیشتری از خود نشان می‌دهند. از طرفی مشاهده می‌شود که در مقادیر بیشتر از ۵ درصد ذرات تقویت کننده، سختی نمونه‌ها افزایش نداشته و کاهش پیدا کرده است. این پدیده می‌تواند به کلوخه‌سازی و توده‌ای شدن ذرات کاربید مولیبدن مربوط باشد. انصاری و همکارانش (۳۰) کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با ذرات اکسید منیزیم را تولید کردند. در این پژوهش نیز با افزایش بیش از ذرات تقویت کننده، مقدار سختی به دلیل پدیده کلوخه‌سازی کاهش پیدا کرد. بر اساس گزارش ارائه شده در این مقاله، جهت بهبود توزیع ذرات تقویت کننده در زمینه می‌توان بارریزی را در دمای پایین‌تری انجام داد. در دمای کمتر بارریزی ترشوندگی ذرات تقویت کننده با زمینه آلومینیوم مطلوب‌تر می‌باشد.

حضور ذرات کاربید مولیبدن باعث ایجاد سطح انرژی بالاتری در سیستم شده که در نهایت با قفل کردن نابه‌جایی‌ها و ممانعت از حرکتشان منجر به افزایش سختی می‌شود. اساس آزمون سختی بر اساس ایجاد تغییر شکل پلاستیک در سطح نمونه است. انجام تغییر شکل پلاستیک نیازمند حرکت نابه‌جایی‌ها می‌باشد حال اگر هر عاملی منجر به ممانعت از حرکت نابه‌جایی‌ها شود، باعث کاهش قابلیت تغییر شکل پلاستیک خواهد شد که نتیجه این فرآیند افزایش سختی می‌باشد. در کامپوزیت‌های زمینه فلزی



شکل ۶- نتایج ریز ساختار نمونه‌های

الف) نمونه Al-0% Mo₂C

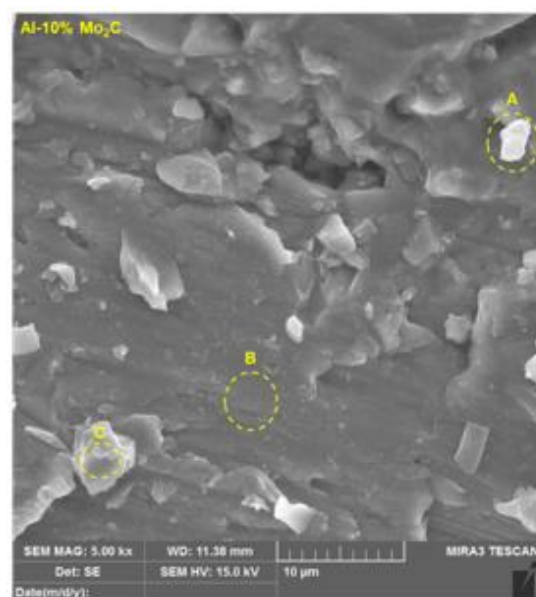
ب) نمونه Al-1% Mo₂C

ج) نمونه Al-3% Mo₂C

د) نمونه Al-5% Mo₂C

و) نمونه Al-10% Mo₂C

به منظور آنالیز عنصری نمونه‌های تولید شده از آنالیز EDS نیز استفاده شد. نتایج این بررسی در شکل ۵ ارائه شده است. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که نقاط سفید رنگ مربوط به ذرات تقویت کننده Mo₂C و نقاط تیره‌رنگ مربوط به زمینه آلومینیوم می‌باشد.



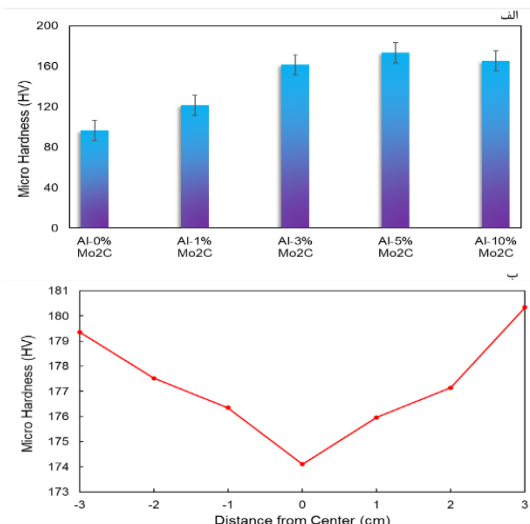
۳-۲ کشش

به منظور بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تولید شده از آزمون کشش نیز استفاده شده است. نتایج این بررسی در شکل ۷ نشان داده شده است. باتوجه به این شکل مشخص است که با حضور ذرات تقویت کننده تا مقدار ۵ درصد، استحکام نمونه‌ها افزایش پیدا کرده و با افزایش مقدار ذرات کاربرد مولیبدن از ۵ تا ۱۰ درصد استحکام افت پیدا کرده است. علت تضعیف خواص مکانیکی نمونه‌ها در درصدهای بالاتر ذرات کاربرد مولیبدن را می‌توان پدیده توده‌ای شدن ذرات کاربرد مولیبدن نسبت داد. پدیده توده‌ای شدن ذرات تقویت کننده در نمونه تقویت شده با ۱۰ درصد کاربرد مولیبدن در نتایج ریزساختار نیز تایید شده است. با توجه به شکل ۷ قسمت الف مشخص است که با حضور ذرات کاربرد مولیبدن درصد ازدیاد طول^۱ نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده کاهش پیدا کرده است. مشخص است که حضور ذرات کاربرد مولیبدن منجر به قفل شدن ناهنجاری‌ها و در نتیجه کاهش قابلیت حرکت آن‌ها می‌شود و همین امر منجر به افزایش استحکام و کاهش شکل پذیری کامپوزیت‌ها شده است.

عواملی همچون توزیع نسبتاً یکنواخت ذرات تقویت کننده، اصلاح ریزساختار، انتقال بار میان زمینه و جزء تقویت کننده و ایجاد ناهنجاری‌ها (به علت اختلاف در ضرایب انبساط حرارتی و مدول الاستیک تقویت کننده و زمینه) از مواردی می‌باشند که باعث افزایش استحکام کامپوزیت می‌شوند (۳۹) دلایل بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها در اثر حضور ذرات تقویت کننده می‌تواند در دو بخش مورد بررسی قرار بگیرد. مورد اول انتقال بار از زمینه به ذرات (به صورت پیوسته) است که از پیوند بدون نقص میان زمینه نرم آلومینیوم و ذرات مستحکم Mo₂C ایجاد شده است. زمانیکه تنش وارد کامپوزیت می‌گردد این تنش از زمینه به ذرات کاربرد مولیبدن منتقل می‌شود که در اثر این انتقال نیرو، زمینه نرم و شکل پذیر متحمل نیروهای کمتری شده و ذرات مستحکم بخش اعظمی از تنش را تحمل می‌کنند. مورد دوم اثرات متالورژیکی و فعال شدن برخی میکرومکانیزم‌های بهبود استحکام در حضور ذرات Mo₂C می‌باشد. میکرومکانیزم‌هایی که می‌توانند منجر به افزایش استحکام کامپوزیت‌ها شوند می‌توانند ناشی از موارد زیر باشند [۶]:

اولین سازوکار مورد بررسی مکانیزم اوروان است. این مکانیزم به این صورت است که در حضور جزء ϵ تقویت کننده، موانع مشخصی در برابر حرکت ناهنجاری‌ها ایجاد می‌شوند که این اتفاق منجر به قفل شدن ناهنجاری‌ها و در نتیجه افزایش استحکام و کارسختی کامپوزیت می‌شود (۴۰، ۴۱) بر اساس نظریه اوروان

تقویت شده با ذرات سرامیکی، معمولاً میان خواص مکانیکی تقویت کننده و زمینه اختلاف زیادی وجود دارد. این مساله باعث تراکم بالای ناهنجاری‌ها در نزدیکی فصل مشترک میان ذرات تقویت کننده و زمینه می‌شود. از دیگر دلایل افزایش تراکم و چگالی ناهنجاری‌ها در حضور ذرات کاربرد مولیبدن اختلاف ضریب انبساط حرارتی کاربرد مولیبدن و آلومینیوم است. به این صورت که در حین انجماد تغییر حجم در کریستال‌های ایجاد شده متفاوت بوده و در نتیجه ناهنجاری‌ها بیشتری ایجاد می‌شود که نتیجه این امر، افزایش چگالی ناهنجاری‌ها است. از طرفی افزایش کرنش عدم تطابق در فصل مشترک ذرات کاربرد مولیبدن و زمینه آلومینیوم توانایی حرکت ناهنجاری‌ها را کاهش داده و در نهایت سختی نمونه کامپوزیت شده افزایش پیدا می‌کند (۳۸) از سوی دیگر بهبود سختی نمونه‌های کامپوزیتی نسبت نمونه آلومینیوم خالص می‌تواند به کاهش اندازه دانه (در اثر حضور ذرات کاربرد مولیبدن) و کاهش فاصله میان بازوهای دندریتی نیز مربوط باشد. شکل ۶ قسمت ب پروفیل سختی نمونه $Al - 5\% Mo_2C$ را نشان می‌دهد. با توجه به تغییرات سختی مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله از سطوح بیرونی نمونه و حرکت به سمت مرکز نمونه سختی کاهش پیدا می‌کند. این موضوع نشان دهنده این مهم می‌باشد که به دلیل ایجاد تلاطم و همزدن در مذاب، ذرات تقویت کننده در سطح بیرونی نمونه‌ها انباشته شده و گرادیان غلظت Mo₂C در نمونه‌های کامپوزیتی ایجاد شده است. بنابراین این دسته از نمونه‌ها می‌توانند برابر کاربردهای سایشی مفیدتر واقع شوند. دلیل این موضوع سختی بالاتر سطح نمونه‌ها نسبت به مرکز نمونه‌ها می‌باشد.



شکل ۶- الف) نتایج آزمون سختی برای نمونه‌های مختلف ب) پروفیل سختی نمونه $Al - 5\% Mo_2C$ از سطح به مرکز نمونه

1 Elongation

۳-۲ خواص تریبولوژیکی

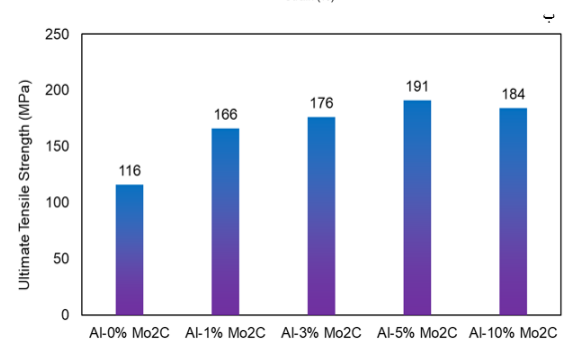
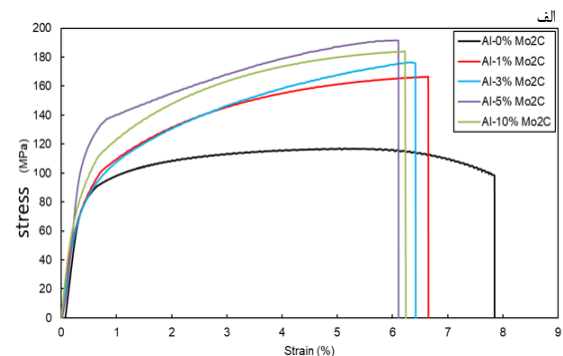
جهت بررسی رفتار تریبولوژیکی نمونه‌های تولید شده از آزمون سایش پین روی دیسک استفاده شد. نتایج این بررسی در شکل ۸ نشان داده شده است. شکل ۸ تغییرات مقدار ضریب اصطکاک (COF) و میانگین این فاکتور در ۱۰۰ متر را برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص است که کامپوزیت‌هایی با درصد مختلف ذرات تقویت کننده رفتار تریبولوژیکی متفاوتی از خود نشان داده‌اند. با حضور ذرات تقویت کننده مقدار COF نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است و افزایش مقدار ذرات کاربید مولیبدن از ۵ درصد تا ۱۰ درصد باعث افزایش مقدار COF شده است. کاهش مقدار COF در اثر حضور ذرات تقویت کننده نشان‌دهنده بهبود رفتار تریبولوژیکی کامپوزیت‌ها می‌باشد. در مقادیر کمتر COF میان پین و نمونه، عامل ساییده (پین) به سهولت بر روی سطح نمونه حرکت کرده و تخریب کمتری بر روی نمونه ایجاد می‌کند. دلیل بهبود رفتار سایشی نمونه‌های کامپوزیتی را می‌توان به افزایش مقاومت کامپوزیت‌ها در برابر ایجاد تغییر شکل پلاستیک نسبت داد. در حین انجام آزمون سایش، بر روی سطح کامپوزیت لهیدگی ایجاد شده و باعث تغییر شکل پلاستیک سطح نمونه می‌شود که در صورت بهبود مقاومت به تغییر شکل پلاستیک، پین ساییده لهیدگی کمتری ایجاد کرده و در نتیجه تخریب کمتری صورت می‌گیرد. به عبارتی پین ساییده بدون ایجاد تخریب (تخریب کمتر) بر روی سطح نمونه می‌لغزد. بنابراین یکی از دلایل بهبود خواص سایشی نمونه‌های کامپوزیتی، سختی بیشتر آن‌ها و مقاومت بیشتر در برابر لهیدگی می‌باشد.

از دیگر عوامل تاثیرگذار در خواص سایشی نمونه‌ها، حضور تخلخل و ناپیوستگی و قدرت پیوند میان جزء تقویت کننده و زمینه می‌باشد. هر چه مقدار تخلخل در زمینه کاهش پیدا کند و قدرت پیوند میان جزء تقویت کننده بالاتر باشد، تخریب نمونه‌ها در اثر آزمون سایش کمتر خواهد بود. پیوند ضعیف بین جزء تقویت کننده و زمینه و تخلخل در سطح محل مناسبی برای تخریب نمونه در حین آزمون سایش می‌باشد. در چنین شرایطی به دلیل درگیر شدن پین ساییده با تخلخل‌ها، مقدار ضریب اصطکاک نمونه افزایش پیدا کرده و تخریب ناشی از سایش بیشتر خواهد شد.

با مطالعه COF کامپوزیت‌ها و مقایسه آن با مقدار COF آلومینیوم خالص مشاهده می‌شود که نمونه‌های کامپوزیتی دارای مقدار کمتر COF نسبت به نمونه آلومینیوم خالص می‌باشند. بهبود مقاومت به سایش (کاهش COF) در اثر حضور ذرات تقویت کننده در پژوهش‌های دیگری نیز تایید شده است (۴۵، ۴۶). از دیگر دلایل کاهش COF در حضور جزء تقویت کننده، وجود ذرات

توزیع یکنواخت ذرات کاربید مولیبدن در زمینه آلومینیوم باعث قفل شدن نابه‌جایی‌ها و افزایش استحکام کامپوزیت شده است. سازوکار دوم در ارتباط با اندازه دانه می‌باشد. براساس رابطه هال-پچ با کاهش اندازه دانه استحکام افزایش می‌یابد. مشخص شد در کامپوزیت‌ها با حضور ذرات تقویت کننده و توزیع یکنواخت آن‌ها، این ذرات به عنوان عامل جواهرزا عمل کرده و ریزساختار نمونه ریزتر می‌شود. در نتیجه این فرآیند در حضور ذرات کاربید مولیبدن به دلیل ریزدانه‌گی ساختار، بر اساس رابطه هال-پچ استحکام کامپوزیت‌ها بهبود پیدا می‌کند (۴۲).

سازوکار سوم مربوط به اختلاف ضریب انبساط حرارتی زمینه آلومینیوم و ذرات تقویت کننده کاربید مولیبدن می‌باشد. ضریب انبساط حرارتی زمینه آلومینیوم (23×10^{-6}) و کاربید مولیبدن (7×10^{-6}) بایکدیگر برابر نبوده و با کاهش دما در حین فرآیند انجماد، تغییر حجم کاربید مولیبدن و آلومینیوم با یکدیگر برابر نمی‌شود. نتیجه این پدیده افزایش بی‌نظمی و نابجایی در سیستم شده که در نهایت باعث بهبود استحکام کامپوزیت می‌شود (۴۲، ۴۳). سازوکار چهارم در خصوص کرنش ناهمسان^۱ در فصل مشترک ذرات تقویت کننده کاربید و مولیبدن (الاستیک) و زمینه آلومینیوم (پلاستیک) می‌باشد. این مکانیزم با بهبود کارسختی منجر به افزایش استحکام نمونه‌های کامپوزیتی می‌شود (۴۴).



شکل ۷- الف) منحنی‌های تنش-کرنش ب) مقادیر استحکام شکست نمونه‌ها با درصد‌های مختلف ذرات تقویت کننده

1 Strain Misfit

۲- حضور ذرات تقویت کننده در کامپوزیت زمینه آلومینیومی منجر به بهبود خواص مکانیکی (سختی، کشش و سایش) کامپوزیت‌های تولید شده می‌شود.

۳- بهترین کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات Mo₂C، کامپوزیت 5% Al - Mo₂C می‌باشد. این کامپوزیت نسبت به سایر کامپوزیت‌ها ی تولید شده دارای توزیع بهتری از فازهای تقویت کننده در زمینه بود.

۴- افزایش درصد ذرات Mo₂C به بیشتر از مقدار ۵ درصد وزنی، منجر به کلوخه‌سازی ذرات در کامپوزیت شده و استحکام کششی را به اندازه ۳ درصد و سختی را به اندازه ۵ درصد نسبت به نمونه تقویت شده با ۳ درصد وزنی تضعیف نمود.

۵- ذرات Mo₂C در ۳ درصد وزنی با قفل کردن نابه‌جایی‌ها و ممانعت از رشد دانه‌ها در حین انجماد، منجر به بهبود استحکام کششی به اندازه ۶۴ درصد و سختی به اندازه ۸۰ درصد نسبت به نمونه خالص شد.

۶- سختی نمونه‌ها در سطح ۳ درصد بیشتر از مرکز نمونه بود. دلیل این موضوع تجمع ذرات تقویت کننده در سطح نمونه به علت نیروی گریز از مرکز در حین همزدن مذاب بود.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

انجام آزمایش‌ها:

تحلیل داده‌ها و نتایج:

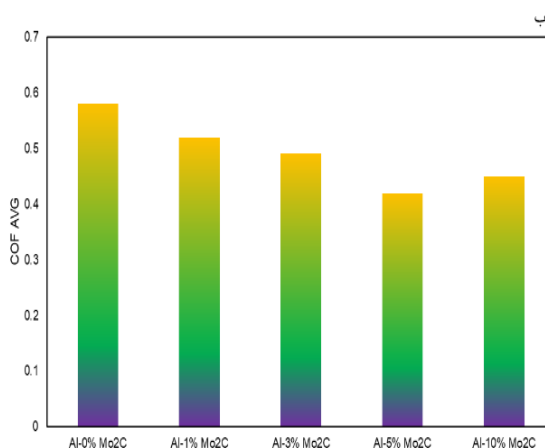
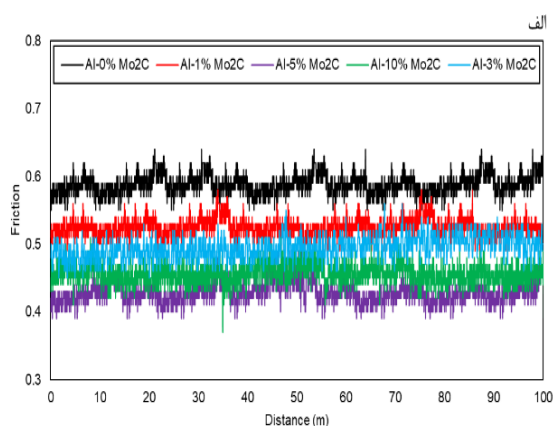
نگارش نهایی:

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

سرامیکی سخت میان پین ساینده و زمینه آلومینیوم است. وجود این ذرات سخت منجر به تسهیل حرکت پین ساینده بر روی سطح نمونه کامپوزیتی می‌شود (۴۵).

یکی دیگر از دلایل بهبود خواص سایشی کامپوزیت‌های زمینه فلزی، خاصیت خودروانکاری ذرات تقویت کننده می‌باشد. ذرات تقویت‌کننده‌ای که در حالت جامد توانایی روان کاری دارند از جمله مواردی هستند که در صورت استفاده از این ذرات در تولید کامپوزیت‌ها، خواص تریبولژیکی کامپوزیت تولید شده بهبود پیدا می‌کند. ذراتی از قبیل کاربید مولیبدن (۴۷) و گرافیت روان کاری مناسبی در فاز جامد دارند (۴۸، ۴۹). بنابراین یکی دیگر از دلایل کاهش مقدار COF در نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با کاربید مولیبدن، خاصیت خودروانکاری این ذره می‌باشد.



شکل ۸- الف) تغییرات مقدار COF در ۱۰۰ متر

ب) میانگین مقدار COF برای نمونه‌ها با درصدهای مختلف ذرات تقویت کننده

نتیجه گیری

۱- تولید کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات Mo₂C توسط روش ریخته‌گری گردابی امکان پذیر است.

References

- De Groot K, Geesink R, Klein CPAT, Serekian P. Plasma sprayed coatings of hydroxylapatite. *J Biomed Mater Res* [Internet]. 1987;21(12):1375–81. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jbm.m.820211203>
- Prabhu B. Microstructural and mechanical characterization of Al-Al₂O₃ nanocomposites synthesized by high-energy milling. 2005 Dec 25 [cited 2025 Apr 22]; Available from: <http://purl.fcla.edu/fcla/etd/CFE0000727>
- Biswas P, Nayak J, Kundu A, Patel D, Mallik A, Das S. A Review on the Development of Processing Techniques for the Production and Casting of Al-Alloy and Metal Matrix Composite Material. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering* [Internet]. 2025;49(1):35–66. Available from: <https://doi.org/10.1007/s40997-024-00773-y>
- Brzezinski T. Squeeze casting of A356 aluminum discontinuous Saffil alumina fibre composites [Internet]. McGill University; 1995. Available from: <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/fb494b40h>
- Miracle D. Metal Matrix Composites – From Science to Technological Significance. *Compos Sci Technol*. 2005 Jan;65:2526–40.
- Hikosaka T, Miki K, Nishida Y. Mechanical Properties of Aluminum–Alumina Particle Composites Fabricated by Vortex Method. *Imono (J Jpn Foundrymen's Soc)*. 1989;61(11):780–6.
- Hashim J, Looney L, Hashmi MSJ. Metal matrix composites: production by the stir casting method. *J Mater Process Technol* [Internet]. 1999;92–93:1–7. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013699001181>
- Skibo MD, Schuster DM. Process for preparation of composite materials containing nonmetallic particles in a metallic matrix, and composite materials made thereby. Google Patents; 1988.
- Hashim J, Looney L, Hashmi MSJ. Particle distribution in cast metal matrix composites—Part I. *J Mater Process Technol* [Internet]. 2002;123(2):251–7. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602000985>
- Hashim J, Looney L, Hashmi MSJ. Particle distribution in cast metal matrix composites—Part II. *J Mater Process Technol* [Internet]. 2002;123(2):258–63. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602000997>
- Ureña A, Salazar G De, Gil, Escalera, Baldonado. Scanning and transmission electron microscopy study of the microstructural changes occurring in aluminium matrix composites reinforced with SiC particles during casting and welding: Interface reactions. *J Microsc*. 1999;196(2):124–36.
- Kobashi M, Choh T. The wettability and the reaction for SiC particle/Al alloy system. *J Mater Sci* [Internet]. 1993;28(3):684–90. Available from: <https://doi.org/10.1007/BF01151245>
- Karandikar PG, Chou TW. Characterization of aluminium-matrix composites made by compocasting and its variations. *J Mater Sci* [Internet]. 1991;26(10):2573–8. Available from: <https://doi.org/10.1007/BF02387719>
- Ilegbusi OJ, Yang J. Porosity nucleation in metal-matrix composites. *Metallurgical and Materials Transactions A* [Internet]. 2000;31(8):2069–74. Available from: <https://doi.org/10.1007/s11661-000-0234-8>
- Ejiofor JU, Reddy RG. Developments in the processing and properties of particulate Al-Si composites. *JOM* [Internet]. 1997;49(11):31–7. Available from: <https://doi.org/10.1007/s11837-997-0008-5>
- Bindumadhavan PN, Chia TK, Chandrasekaran M, Wah HK, Lam LN, Prabhakar O. Effect of particle-porosity clusters on tribological behavior of cast aluminum alloy A356-SiCp metal matrix composites. *Materials Science and Engineering: A* [Internet]. 2001;315(1):217–26. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509300019894>
- Kala H, Mer KKS, Kumar S. A Review on Mechanical and Tribological Behaviors of Stir Cast Aluminum Matrix Composites. *Procedia Materials Science* [Internet]. 2014;6:1951–60. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221181281400594X>
- Pashmforoosh S, Shahriyari S, Mirzaee O. Evaluation of Mechanical and Microstructure Properties of Mg-Modified Aluminum Matrix Composite by Vortical Casting Method. *Metals and Materials International* [Internet]. 2020;27:3026–38. Available from: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:211110412>
- Al-Furjan MSH, Hajmohammad MH, Shen X, Rajak DK, Kolahchi R. Evaluation of tensile strength and elastic modulus of 7075-T6 aluminum alloy by adding SiC reinforcing particles using vortex casting method. *J Alloys Compd* [Internet]. 2021;886:161261. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838821026700>
- Gurmaita PK, Pongen R, Gurmaita S. A7075 alloy reinforced metal matrix composites fabricated through stircasting route: a review. *International*

Journal of Cast Metals Research. 2024 May 24;37:1–48.

21. Chen Z, Wang T, Zheng Y, Zhao Y, Kang H, Gao L. Development of TiB₂ reinforced aluminum foundry alloy based in situ composites – Part I: An improved halide salt route to fabricate Al–5wt%TiB₂ master composite. Materials Science and Engineering: A [Internet]. 2014;605:301–9. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509314002500>

22. Tee KL, Lu L, Lai MO. In situ processing of Al–TiB₂ composite by the stir-casting technique. J Mater Process Technol [Internet]. 1999;89–90:513–9. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013699000382>

23. Lekatou A, Karantzalis AE, Evangelou A, Gousia V, Kaptay G, Gácsi Z, et al. Aluminium reinforced by WC and TiC nanoparticles (ex-situ) and aluminide particles (in-situ): Microstructure, wear and corrosion behaviour. Materials & Design (1980-2015) [Internet]. 2015;65:1121–35. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306914006566>

24. Rahvard MM, Tamizifar M, Boutorabi SMA, Gholami Shiri S. Characterization of the graded distribution of primary particles and wear behavior in the A390 alloy ring with various Mg contents fabricated by centrifugal casting. Materials & Design (1980-2015) [Internet]. 2014;56:105–14. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306913010091>

25. Rajan TPD, Pai BC. Formation of solidification microstructures in centrifugal cast functionally graded aluminium composites. Transactions of the Indian Institute of Metals [Internet]. 2009;62(4):383–9. Available from: <https://doi.org/10.1007/s12666-009-0067-0>

26. Kim K, Kim D, Park K, Cho M, Cho S, Kwon H. Effect of Intermetallic Compounds on the Thermal and Mechanical Properties of Al–Cu Composite Materials Fabricated by Spark Plasma Sintering. Materials. 2019 May 10;12:1546.

27. Çalışkan F, Kocaman E, Tehçi T. Synthesis of B₄C–SiC in-Situ Composite Powders through Carbothermic Reactions. Acta Phys Pol A [Internet]. 2018 Jan;134(1):113–5. Available from: <https://doi.org/10.12693/aphyspola.134.113>

28. Yang X, Wang F, Fan Z. Crystallographic study of nucleation in SiC particulate reinforced magnesium matrix composite. J Alloys Compd [Internet]. 2017;706:430–7. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838817306941>

29. Chen F, Chen Z, Mao F, Wang T, Cao Z. TiB₂ reinforced aluminum based in situ composites fabricated by stir casting. Materials Science and

Engineering: A [Internet]. 2015;625:357–68. Available from:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509314015330>

30. Yar AA, Montazerian M, Abdizadeh H, Baharvandi HR. Microstructure and mechanical properties of aluminum alloy matrix composite reinforced with nano-particle MgO. J Alloys Compd [Internet]. 2009;484(1):400–4. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092583880900855X>

31. Kalaiselvan K, Murugan N, Parameswaran S. Production and characterization of AA6061–B₄C stir cast composite. Mater Des [Internet]. 2011;32(7):4004–9. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911001750>

32. Bodunrin MO, Alaneme KK, Chown LH. Aluminium matrix hybrid composites: a review of reinforcement philosophies; mechanical, corrosion and tribological characteristics. Journal of Materials Research and Technology [Internet]. 2015;4(4):434–45. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785415000691>

33. Sajjadi SA, Ezatpour HR, Beygi H. Microstructure and mechanical properties of Al–Al₂O₃ micro and nano composites fabricated by stir casting. Materials Science and Engineering: A [Internet]. 2011;528(29):8765–71. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509311009464>

34. Hikosaka T, Miki K, Nishida Y. Mechanical Properties of Aluminum–Alumina Particle Composites Fabricated by Vortex Method. Imono(J Jpn Foundrymen's Soc). 1989;61(11):780–6.

35. Hashim J, Looney L, Hashmi MSJ. The wettability of SiC particles by molten aluminium alloy. J Mater Process Technol [Internet]. 2001;119(1):324–8. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401360100975X>

36. Shorowordi KM, Laoui T, Haseeb ASMA, Celis JP, Froyen L. Microstructure and interface characteristics of B₄C, SiC and Al₂O₃ reinforced Al matrix composites: a comparative study. J Mater Process Technol [Internet]. 2003;142(3):738–43. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401360300815X>

37. Sujith S V, Mahapatra MM, Mulik RS. Microstructural characterization and experimental investigations into two body abrasive wear behavior of Al-7079/TiC in-situ metal matrix composites. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology [Internet]. 2019 Oct 21;234(4):588–607. Available from: <https://doi.org/10.1177/1350650119883559>

38. George R, Kashyap KT, Rahul R, Yamdagni S. Strengthening in carbon nanotube/aluminium

- (CNT/Al) composites. *Scr Mater* [Internet]. 2005;53(10):1159–63. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646205004483>
39. Sajjadi SA, Ezatpour HR, Torabi Parizi M. Comparison of microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy/Al₂O₃ composites fabricated by stir and compo-casting processes. *Mater Des* [Internet]. 2012;34:106–11. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911005152>
40. Lloyd DJ. Particle reinforced aluminium and magnesium matrix composites. *International Materials Reviews* [Internet]. 1994 Jan 1;39(1):1–23. Available from: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1179/imr.1994.39.1.1>
41. Zhang Z, Chen DL. Contribution of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites. *Materials Science and Engineering: A* [Internet]. 2008;483–484:148–52. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509307009343>
42. Yuan W, Panigrahi SK, Su JQ, Mishra RS. Influence of grain size and texture on Hall–Petch relationship for a magnesium alloy. *Scr Mater* [Internet]. 2011;65(11):994–7. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646211005057>
43. Belov NA, Aksenov AA, Eskin DG. Iron in aluminium alloys [Internet]. 2002. Available from: <https://doi.org/10.1201/9781482265019>
44. Rejil CM, Dinaharan I, Vijay SJ, Murugan N. Microstructure and sliding wear behavior of AA6360/(TiC+B₄C) hybrid surface composite layer synthesized by friction stir processing on aluminum substrate. *Materials Science and Engineering: A* [Internet]. 2012;552:336–44. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509312007411>
45. Singla M, Singh L, Chawla V. Study of wear properties of Al-SiC composites. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering* [Internet]. 2009 Jan;08(10):813–21. Available from: <https://doi.org/10.4236/jmmce.2009.810070>
46. Li JC, Lin X, Kang N, Lu JL, Wang QZ, Huang WD. Microstructure, tensile and wear properties of a novel graded Al matrix composite prepared by direct energy deposition. *J Alloys Compd* [Internet]. 2020;826:154077. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838820304400>
47. Furlan KP, de Mello JDB, Klein AN. Self-lubricating composites containing MoS₂: A review. *Tribol Int* [Internet]. 2018;120:280–98. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X17305911>
48. Mahmoud ERI, Takahashi M, Shibayanagi T, Ikeuchi K. Wear characteristics of surface-hybrid-MMCs layer fabricated on aluminum plate by friction stir processing. *Wear* [Internet]. 2010;268(9):1111–21. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164810000062>
49. Tjong SC, Lau KC, Wu SQ. Wear of al-based hybrid composites containing BN and SiC particulates. *Metallurgical and Materials Transactions A* [Internet]. 1999;30(9):2551–5. Available from: <https://doi.org/10.1007/s11661-999-0265-8>