



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Evaluation of the Microstructure and Wear Properties of A356/Al₂O₃ Nanocomposite Produced by Stir Casting Method

Elnaz Hamidi¹, Hassan Saghafian^{2,*}

1. M.Sc. Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology.

2. Associate Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology.

Received 22 November 2017

Accepted 28 December 2017

Abstract:

The effect of alumina nanoparticles contents with the average size of 40 nm on the microstructure and wear behavior of A356/Al₂O₃ nanocomposite produced through stir casting was studied. The alumina nanoparticles with the amounts of 1, 1.5 and 2 weight percent, were incorporated into the molten matrix alloy being mechanically stirred, along with blowing an inert gas. To improve the nanoparticles wettability, 1wt% Mg was added to the molten matrix alloy. The microstructure of the nanocomposite was studied by using optical and scanning electron microscopes. The microstructural observations showed that the alumina nanoparticles have been evenly distributed within the matrix. The percent of porosity measured by the Archimedes method is increased with increasing the nanoparticles weight percent from 1.3% to 3.2 %. It was shown that, the increased percent of porosity can be attributed to the increase in the particles agglomeration with increasing particles weight percent. To study the wear behavior of the materials, nanocomposite containing 1wt% alumina, having the lowest porosity percent and even distribution of nanoparticles, was selected. The wear test showed that the addition of nanoparticles to the matrix alloy gave rise to enhance its wear resistance. Study of the worn surfaces and sub surfaces showed that the dominant wear mechanism for the materials used in the current work is probably an adhesive wear followed by the formation of a mechanically mixed layer (MML). However, this mechanism occurred with the less wear rate for the nanocomposite as a result of the presence of reinforcing particles.

Keywords:

Nanocomposite,
Wear,
Aluminum,
Alumina,
Stir casting.

Journal homepage: www.foundingjournal.ir

Please cite this article using:

Hamidi E., Saghafian H., Evaluation of the Microstructure and Wear Properties of A356/Al₂O₃ Nanocomposite Produced by Stir Casting Method, in Persian, Founding Research Journal, 2017, 1(1) 59-68.
DOI: 10.22034/frj.2017.54490

* Corresponding Author:

Hassan Saghafian, Associate Professor

Address: School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology,
P.O. Box 16846-13114, Narmak, Tehran, Iran. Tel/Fax: +98 21 77240371.

E-mail: Saghafian@iust.ac.ir



فصل‌نامه علمی پژوهشی

پژوهش‌نامه ریخته‌گری

انجمن علمی ریخته‌گری ایران

بررسی ریزساختار و خواص سایشی نانو کامپوزیت $A356/Al_2O_3$ تولید شده به روش ریخته‌گری هم‌زدنی

انلناز حمیدی^۱، حسن تقفیان^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد شناسایی، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، e.hamidi71@gmail.com

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، Saghafian@iust.ac.ir (نویسنده مکاتبه کننده)

چکیده:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۰۱

پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۰۷

تأثیر نانو ذرات آلومینا با اندازه متوسط ۴۰ نانومتر بر ریزساختار و رفتار سایشی نانو کامپوزیت با زمینه‌ی آلیاژ A356 آلومینیم تهیه شده به روش ریخته‌گری هم‌زدنی، مورد بررسی قرار گرفت. نانو ذرات آلومینا با مقادیر ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزنی به همراه گاز خنثی به داخل مذاب آلیاژ زمینه که به طور مکانیکی هم زده می‌شد، اضافه گردید. برای بهبود ترشوندگی نانوذرات، منیزیم خالص به مقدار یک درصد وزنی به مذاب افزوده شد. ریزساختار نانو کامپوزیت تهیه شده توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که نانو ذرات از توزیع نسبتاً یکنواختی برخوردارند. اندازه‌گیری درصد تخلخل نمونه‌های نانو کامپوزیتی با استفاده از روش ارشمیدس نشان داد که با افزایش درصد وزنی نانو ذرات، درصد تخلخل نیز از ۱/۳ به ۳/۲ درصد افزایش پیدا کرد. نشان داده شد که با افزایش درصد وزنی نانو ذرات، مقدار تخلخل افزایش یافت. به منظور بررسی رفتار سایشی، نمونه‌ی حاوی ۱ درصد وزنی نانو ذرات آلومینا که دارای کمترین میزان تخلخل و یکنواخت ترین توزیع نانو ذرات بود، انتخاب شد. بر اساس نتایج آزمون سایش، نانو کامپوزیت مورد آزمایش از مقاومت سایشی بالاتری در مقایسه با آلیاژ زمینه برخوردار بوده است. مطالعه سطوح تحت سایش و نواحی زیر آن نشان داد که مکانیزم غالب در این فرآیند سایش، سایش چسبان به همراه تشکیل لایه‌ی مختلط مکانیکی است که در مورد نمونه‌ی نانو کامپوزیتی، به دلیل مقاوم‌سازی ناشی از حضور نانو ذرات، این مکانیزم با نرخ کمتری صورت گرفته است.

واژه‌های کلیدی:

نانو کامپوزیت،

سایش،

آلومینیم،

آلومینا،

ریخته‌گری هم‌زدنی

۱- مقدمه

خواص مجزایی دارند، ساخته می‌شوند. نانو کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی زیر گروهی از این مواد پیشرفته هستند که در آن‌ها جزء تقویت‌کننده دارای ابعادی کمتر از ۱۰۰ نانومتر است. ساختار و خواص این نانو کامپوزیت، توسط نوع و اندازه تقویت‌کننده، ماهیت اتصال، روش ساخت، مقدار و نحوه‌ی توزیع جزء تقویت‌کننده در زمینه فلزی کنترل می‌شود. تقویت‌کننده‌های نانو ذره‌ای در زمینه‌ای از آلیاژهای آلومینیم، یکی از عوامل کلیدی در تولید مواد پیشرفته و بهبود خواص مکانیکی هستند [۳].

به طور معمول، ذرات میکرونی برای بهبود استحکام کششی و استحکام تسلیم استفاده می‌شود. با این حال، شکل‌پذیری کامپوزیت‌های زمینه فلزی با افزودن بیشتر ذرات سرامیکی

کامپوزیت‌های زمینه فلزی در دو دهه گذشته به صورت گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و در هوافضا، صنایع نظامی و خودرو بسیار حائز اهمیت هستند. این کامپوزیت‌ها شامل یک زمینه فلزی با تقویت‌کننده‌ی معمولاً سرامیکی هستند [۱]. اخیراً کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. دلایل اصلی استفاده از این کامپوزیت‌ها را می‌توان به ویژگی‌هایی همچون خواص فیزیکی و مکانیکی عالی مانند چگالی کم، خواص حرارتی و الکتریکی عالی، استحکام بالا، مقاومت به سایش خوب، نسبت داد [۲]. کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی مواد پیشرفته‌ای هستند که با ترکیب کردن دو یا چند ماده که

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی، مکانیزم سایش حاکم، عموماً از نوع سایش چسبان است که به دنبال آن شرایط تشکیل لایه‌ای سطحی موسوم به لایه‌ی مختلط مکانیکی فراهم می‌شود. این لایه در نتیجه‌ی مخلوط شدن اجزای تشکیل دهنده‌ی آلیاژ زمینه و مقاوم‌ساز تحت بار و سرعت مشخص تشکیل می‌شود و با ادامه حرکت سطوح روی یکدیگر متراکم می‌شود. این لایه سطحی در بارهای وارد شده‌ی کم (شرایط سایش ملایم)، می‌تواند موجب بهبود مقاومت سایشی این مواد شود [۱۱].

در تحقیق پیش رو، نانو کامپوزیتی با زمینه‌ای از آلیاژ A356 تقویت شده با نانوذرات آلومینا، از طریق ریخته‌گری هم‌زدنی ساخته شده است. ریزساختار نانو کامپوزیت یاد شده توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی (SEM) بررسی شد. علاوه بر این، رفتار سایشی مواد تهیه شده توسط دستگاه پین روی دیسک بر اساس استاندارد ASTM-G99 مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- مواد و روش تحقیق

مواد اولیه‌ی مورد نیاز برای زمینه‌ی کامپوزیت، شامل شمش A356 بود که ترکیب آن در جدول (۱) آورده شده است. همچنین نانو ذرات آلومینا با میانگین اندازه ذرات ۴۰ nm به عنوان تقویت‌کننده استفاده شد. برای ریخته‌گری نمونه‌های کامپوزیتی از یک دستگاه متشکل از یک کوره‌ی مقاوم‌تی ساخت داخل کشور، با ظرفیت گرمایش 1200°C به منظور ذوب آلیاژ تحت اتمسفر آرگون با یک هم‌زن پارویی از جنس تیتانیوم و بوتله‌ی آلومینایی، مجهز به سیستم کفریز استفاده شد. طرحواره‌ی کوره‌ی استفاده شده در شکل (۱) آمده است.

برای انجام عملیات ذوب، ۴۰۰ گرم از شمش آلومینیم A356 در هر مرحله در بوتله‌ی آلومینایی شارژ و دما تا 670°C بالا برده شد. همچنین نانوذرات آلومینا متناسب با درصد‌های وزنی ۱، ۱/۵ و ۲ توزین شدند. سپس در داخل کوره برای انجام عملیات پیش‌گرم به مدت ۲h در دمای 450°C وارد شدند. پس از اینکه ذوب به صورت کامل انجام شد، به‌منظور بهبود ترشوندگی، منیزیم خالص به مقدار ۱٪ وزنی به مذاب اضافه شد. سپس ذرات تقویت‌کننده توسط سیستم تزریق متصل به گاز آرگون با خلوص ۹۸/۵٪ و با نرخ تزریق ۰/۵ gr/min به مذاب اضافه شد و هم‌زمان با اضافه کردن ذرات، عملیات هم‌زدن به

به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. معمولاً تمایل بر این است که برای تقویت زمینه فلزی از نانو ذرات سرامیکی استفاده شود که در این حالت انعطاف‌پذیری خوب و استحکام دما بالا به دست می‌آید [۴].

کامپوزیت‌های زمینه فلزی را می‌توان از طریق فرآیندهای مختلف حالت جامد، مایع یا گاز تولید کرد. در میان روش‌های ساخت مختلف برای این کامپوزیت‌ها، روش ریخته‌گری هم‌زدنی، یکی از مقرون به صرفه‌ترین و ساده‌ترین روش‌ها برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی است [۲]. با این حال، قابلیت‌تر شدن و امکان توزیع یکنواخت ذرات مقاوم‌ساز بویژه در مقیاس نانومتری به علت وجود مدول سطحی بسیار بالای این ذرات و در نتیجه تمایل شدید آن‌ها به آگلومره شدن، مهم‌ترین چالش در تولید نانو کامپوزیت‌های زمینه فلزی به روش ریخته‌گری است. فرآیند ذوب چند مشکل عمده دارد که مهم‌ترین آن‌ها مشکل ترشوندگی ذرات سرامیکی توسط مذاب است. همچنین تفاوت میان چگالی ذرات و آلیاژ زمینه، تمایل به جداسازی ذرات به صورت ته‌نشین یا شناور شدن آن‌ها را تشدید می‌کند که این امر هم موجب عدم توزیع یکنواخت ذرات می‌شود [۵].

آلیاژهای آلومینیم سیلیسیم، به ویژه آلیاژ A356، به دلیل داشتن خواص برتر، از جمله مقاومت خوب در برابر خوردگی، ضریب انبساط حرارتی پایین، قابلیت ریخته‌گری عالی، چگالی کم، نسبت استحکام به وزن بالا و خواص مکانیکی بهبود یافته به طور گسترده‌ای در صنعت استفاده می‌شوند [۶].

یکی از مواد سرامیکی متداول که به عنوان جزء مقاوم‌ساز در زمینه‌های آلومینیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد، اکسید آلومینیم (Al_2O_3) است که به دلیل دارا بودن سختی و استحکام خوب و ضریب انبساط حرارتی پایین، برای کاربردهای درجه حرارت بالا استفاده می‌شود [۶].

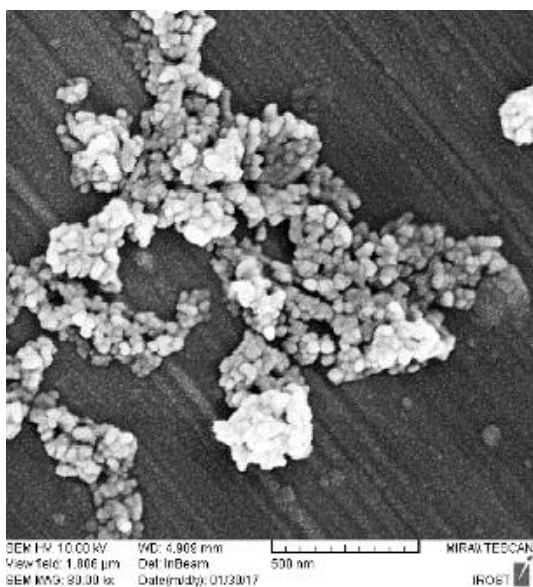
یکی از زمینه‌های کاربردی آلیاژهای آلومینیم تقویت‌شده با ویسکرها سرامیکی، الیاف و ذرات، کاربردهای سایشی است. تأثیر متغیرهای مربوط به جزء مقاوم‌ساز همچون نوع، مقدار و اندازه، بر مقاومت سایشی این مواد در تحقیقات زیادی بررسی شده است که از میان این متغیرها، به تأثیر مقدار مقاوم‌ساز بر مقاومت در برابر سایش مواد مذکور تأکید شده است [۷-۱۰]. بر اساس نتایج بدست آمده از تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی مطالعه‌ی رفتار سایشی

صورت چگالی ظاهری نمونه از تقسیم وزن نمونه به حجم واقعی به دست آمد. چگالی آلیاژ 8356 g/cm^3 و 2166 g/cm^3 چگالی آلومینا، 3195 g/cm^3 است. برای بررسی خواص سایشی نانوکامپوزیت تولید شده، از دستگاه پین روی دیسک برای انجام آزمایش سایش خشک مطابق استاندارد ASTM-G99 استفاده شد. به این منظور، پین‌هایی از نانوکامپوزیت به قطر 5 mm و ارتفاع 20 mm تهیه شدند. آزمایش سایش تحت بارهای 5 N ، 10 N و 15 N و با سرعت ثابت 0.21 m/s و مسافت 1000 m ، در دمای محیط انجام شد. کاهش وزن نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت 0.0001 g اندازه‌گیری شد. برای مطالعه‌ی مناطق زیر سطح ساییده شده، از میکروسکوپ نوری مدل Huvitz HR3-TRF-P استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- توزیع نانوذرات در زمینه‌ی A356

شکل (۲)، تصویر گرفته شده از طریق میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی پودر نانوالومینای استفاده شده با اندازه متوسط 40 nm را نشان می‌دهد. همچنین الگوی پراش اشعه ایکس پودر نانو آلومینا نیز در شکل (۳) نشان داده شده است. این آزمایش صرفاً جهت شناسایی پودر دریافتی بوده است. همان‌طور که دیده می‌شود، پودر آلومینای استفاده شده دارای ساختمان کریستالی هگزاگونال و مونوکلینیک است.

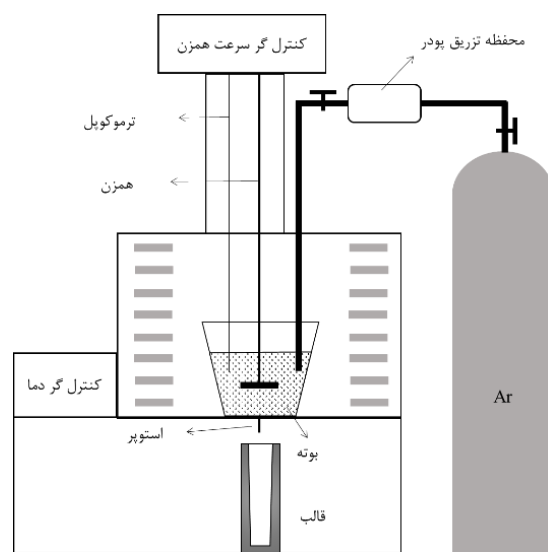


شکل ۲- تصویر FESEM از پودر آلومینای استفاده شده

مدت زمان 40 s با سرعت 420 rpm انجام گرفت. سپس مذاب کامپوزیتی تولید شده در حین هم‌زدن به قالب استوانه‌ای از جنس فولاد کم کربن به قطر داخلی و ضخامت 30 mm و ارتفاع 150 mm تخلیه شد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ A356 (درصد وزنی)

Zn	Ti	Ni	Mg	Cu	Fe	Si	Al
۰/۰۶	۰/۱۶	۰/۲	۰/۳۷	۰/۰۴	۰/۲۲	۷/۶۳	پایه



شکل ۱- طرح‌واره‌ی کوره‌ی استفاده شده در تحقیق حاضر

برای بررسی ریزساختار نمونه‌ها، سنباده‌زنی و پرداخت نهایی انجام شد. توزیع نانوذرات در زمینه توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و مورفولوژی پودر آلومینا توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین پودر آلومینای استفاده شده توسط تفرق اشعه ایکس^۱ آنالیز شد. برای محاسبه‌ی تخلخل نمونه‌ها، روش ارشمیدس استفاده شد. برای محاسبه‌ی تخلخل نمونه‌ها، وزن نمونه‌ها در حالت خشک اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری حجم واقعی نمونه‌ها، از یک ظرف مدرج حاوی 20 ml آب استفاده شد. به این صورت که هر نمونه داخل ظرف انداخته شد و تغییر حجم ایجاد شده، نمایان‌گر حجم واقعی نمونه‌ها بود. به این

^۱ X-Ray Diffraction

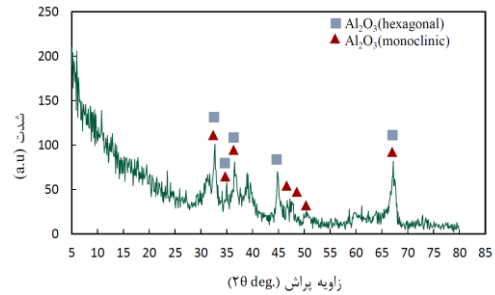
تصویربرداری از مقاطع نانوکامپوزیت‌های ریختگی به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. شکل (۴) تصاویر نانوکامپوزیت A356/Al₂O₃ با درصدهای وزنی ۱، ۱/۵ و ۲ را نشان می‌دهد. با توجه به تصاویر، مشخص است که نانو ذرات آلومینا با موفقیت وارد مذاب فلزی شده و توزیع شده‌اند.

در خصوص نمونه‌ی تقویت شده با ۱ درصد وزنی آلومینا، توزیع یکنواختی از نانو ذره‌ها با آگلومره‌های کمتر در زمینه مشاهده می‌شود. این امر نشان‌دهنده‌ی ترشوندگی خوب ذرات در زمینه است. در مورد نمونه‌ی تقویت‌شده با ۱/۵ درصد وزنی آلومینا، نسبت به کامپوزیت تقویت‌شده با ۱ درصد وزنی آلومینا، ذرات آگلومره شده‌ی بیشتری در زمینه دیده می‌شود. در کامپوزیت تقویت‌شده با ۲ درصد وزنی آلومینا نیز نسبت به نمونه‌های با ۱ و ۱/۵ درصد وزنی آلومینا، ذرات بیشتر آگلومره شده‌اند. با افزایش درصد مقاوم‌ساز، ترشوندگی کاهش می‌یابد [۱۲]. مشکل ترشوندگی ذرات سرامیکی توسط مذاب فلزی، به دلیل خصوصیات شیمیایی سطح ذره و کشش سطحی است. خصوصیات شیمیایی سطح ذرات، شامل لایه‌های اکسیدی یا آلودگی‌ها است که باید برطرف شوند [۱۳].

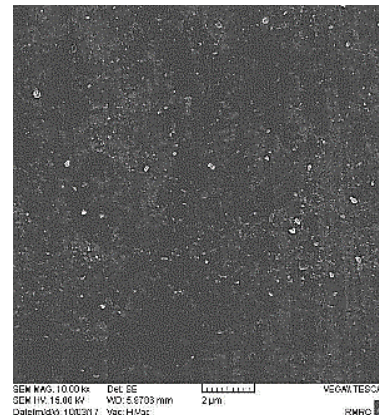
کم شدن اندازه ذرات از میکرومتر به نانومتر نتایج قابل ملاحظه‌ای را در بردارد. ذرات در حالت نانومتری دارای انرژی سطحی بالایی هستند. این به دلیل بزرگ بودن نسبت سطح به حجم ذرات است [۳]. در نتیجه در مقیاس نانو، ذرات تمایل بیشتری برای آگلومره شدن خواهند داشت.

در روش ریخته‌گری گردابی عواملی مثل سرعت هم‌زدن، موقعیت هم‌زن در مذاب کامپوزیتی و زمان هم‌زدن، می‌تواند توزیع ذرات در بخش‌های مختلف یک کامپوزیت را تحت تأثیر قرار دهد. پیش‌گرم کردن ذرات، کنترل پارامترهای فرآیند مانند سرعت هم‌زدن، زمان هم‌زدن موجب افزایش ترشوندگی ذرات در مذاب شدند. علاوه بر این، سرعت انجماد ناشی از قدرت سردکنندگی قالب فلزی، باعث توزیع مناسبی از ذرات در کل زمینه شده است [۶، ۱۲، ۱۳].

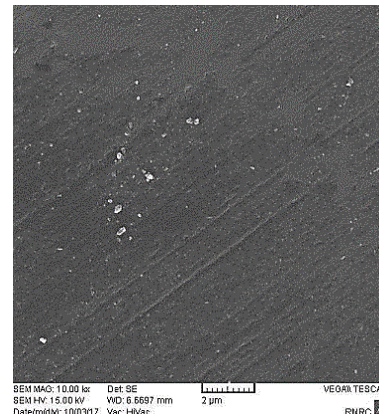
همان‌گونه که قبلاً به آن اشاره شد، برای افزایش ترشوندگی ذرات آلومینا توسط مذاب آلومینیم، منیزیم به میزان یک درصد وزنی به مذاب اضافه شد. دلیل این امر ایجاد تمایل شیمیایی میان مذاب و نانو ذرات آلومینا برای تشکیل



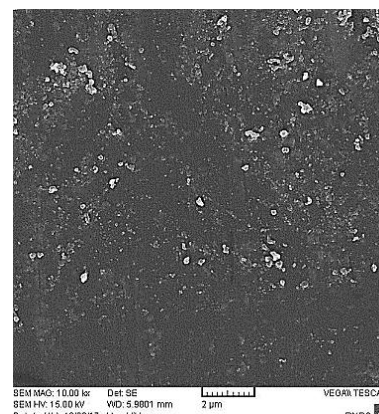
شکل ۳- الگوی پراش اشعه ایکس پودر نانو آلومینا



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴- تصاویر SEM از نانوکامپوزیت‌ها با: (الف) ۱٪ وزنی آلومینا، (ب) ۱/۵٪ وزنی آلومینا، (ج) ۲٪ وزنی آلومینا

دلیل عمل هم‌زدن تشکیل تخلخل اجتناب ناپذیر است. همچنین نانو ذرات آلومینا تمایل به آگلومره شدن دارند که موجب به دام افتادن هوا بین ذرات می‌شود. البته بیشتر شدن زمان تزریق به دلیل افزایش درصد وزنی و تعداد ذرات، موجب ورود و به دام افتادن درصد بیشتری از گازها شده است.

۳-۳- بررسی رفتار سایشی

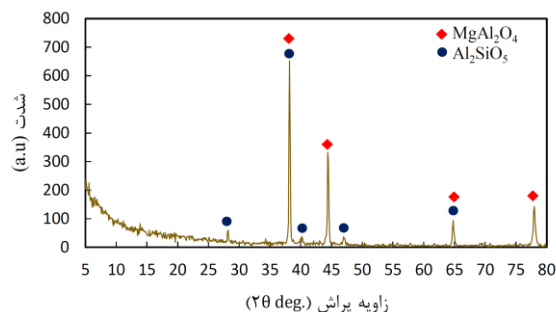
با توجه به اینکه ناهمگنی‌های موجود در قطعات ریخته‌گی از جمله تخلخل‌های گازی و انقباضی بر استحکام و مقاومت سایشی آن‌ها تأثیر می‌گذارد [۱۵]، از این رو، به منظور بررسی مقاومت سایشی نانوکامپوزیت‌های تهیه شده، نمونه‌ای که دارای کمترین درصد تخلخل بوده است (نمونه‌ی حاوی ۱٪ وزنی آلومینا) انتخاب شد و به همراه نمونه‌های تهیه شده از آلیاژ زمینه، تحت آزمون پین روی دیسک قرار گرفت.

در شکل (۷)، نمودار تغییرات کاهش وزن نمونه‌های نانوکامپوزیتی و آلیاژ زمینه تحت بارهای ۵N، ۱۰N و ۱۵N و مسافت ۱۰۰۰m نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کاهش وزن نمونه‌ها با افزایش مسافت و بار اعمالی به سطح نمونه افزایش می‌یابد. همچنین دیده می‌شود که صرف نظر از بار اعمالی، نمونه‌های نانوکامپوزیتی دارای کاهش وزن کمتری در مقایسه با آلیاژ زمینه هستند. بر اساس رابطه‌ی آرچارد (رابطه ۱)، با افزایش بار اعمالی برای نمونه‌ای با سختی مشخص، نرخ سایش نیز افزایش پیدا می‌کند که این امر با توجه به افزایش سطح تماس پین و دیسک و در نتیجه افزایش عمق ناحیه‌ی تغییر شکل یافته‌ی پلاستیکی قابل انتظار است (شکل‌های ۸ و ۹).

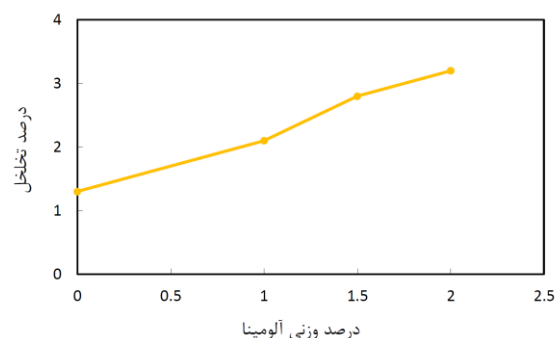
$$Q = K \cdot \frac{W}{H} \quad (1)$$

که Q نرخ سایش، K ثابتی است که ضریب سایش نام دارد و H سختی نمونه بر حسب ویکرز است [۱۶]. از طرف دیگر، با توجه به اینکه سختی (استحکام) با نرخ سایش رابطه‌ی معکوس دارد، طبیعی است که با مقاوم‌سازی آلیاژ زمینه توسط نانو ذرات آلومینا، سختی و استحکام زمینه افزایش پیدا می‌کند که این امر به بهبود مقاومت سایشی در این مواد منجر می‌شود [۱۷، ۱۸].

اسپینل است که در نتیجه‌ی آن ترشوندگی بهبود پیدا می‌کند. حضور این فاز در الگوی پراش اشعه‌ی ایکس بدست آمده از نمونه‌ی نانوکامپوزیتی، شکل (۵)، مشهود است.



شکل ۵- الگوی پراش اشعه‌ی ایکس از نمونه‌ی نانوکامپوزیت



شکل ۶- تغییرات تخلخل نمونه‌ی نانوکامپوزیت با افزایش آلومینا

۳-۲- تأثیر نانو ذرات بر تخلخل

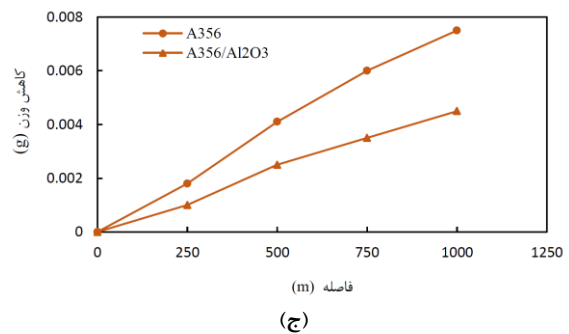
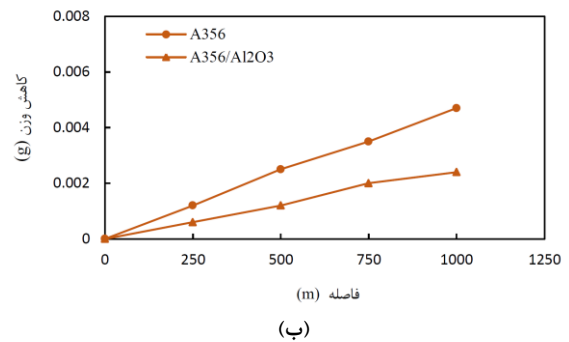
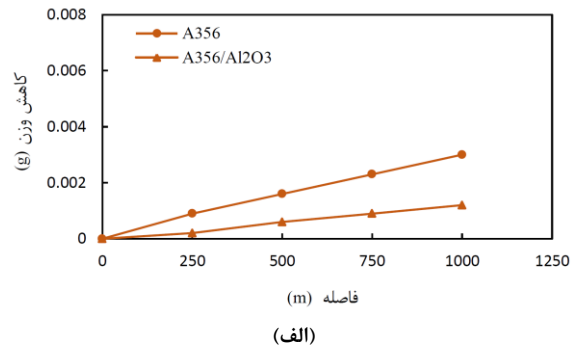
مطابق شکل (۶)، میزان تخلخل نمونه‌ها با افزایش درصد وزنی نانوذرات آلومینا افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه سطح ذرات یکی از مکان‌های مناسب برای جوانه‌زنی حباب گازی در مذاب است، با افزایش کسر وزنی نانو ذرات این امر نیز تشدید می‌شود. علاوه بر این، به دلیل افزایش تمایل نانو ذرات به آگلومره شدن با افزایش کسر وزنی آن و در نتیجه کاهش ترشوندگی، گیر افتادن و حبس شدن گاز در محل تجمع این ذرات، به ویژه در طول هم‌زدن مذاب، تشدید می‌شود. به طور کلی، کسر حجمی تخلخل، اندازه و توزیع آن در یک کامپوزیت زمینه فلزی، نقش مهمی در کنترل خواص مکانیکی آن ایفا می‌کند [۱۴].

یکی از مشکلات اساسی روش ریخته‌گری گردابی در اتمسفر گازی، ورود حباب‌های گازی از سطح مذاب به داخل آن توسط عمل هم‌زدن است [۱۲]. در نتیجه به

به دلیل داشتن سختی بیشتر، موجب کاهش سطح تماس واقعی میان پین و دیسک و در نتیجه کاهش ضریب اصطکاک سطح شده است.

همان‌گونه که در تصاویر مقاطع برشی عمود بر سطوح سایش نمونه‌های مربوط به آلیاژ زمینه و نانوکامپوزیت حاوی ۱٪ وزنی نانو ذرات آلومینا مشاهده می‌شود، ترک‌هایی در ناحیه‌ی تغییر شکل یافته‌ی پلاستیکی وجود دارد که در نهایت به سطوح سایش منتهی می‌شوند (شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰). این ترک‌ها که در اثر کار سختی حاصل از حرکت نسبی سطوح پین و دیسک تحت بار اعمالی ایجاد می‌شود، معمولاً در نقطه‌ای زیر سطح سایش در محلی که مناسب برای تمرکز تنش است (فصل مشترک ذرات مقاوم‌ساز و سیلیسیم یوتکتیک با زمینه‌ی آلومینیومی و نیز تخلخل‌های موجود)، در ابتدا به صورت ریز ترک جوانه می‌زنند و سپس با افزایش مسافت لغزش گسترش یافته و با ادغام در یکدیگر در جهت موازی با جهت سایش، به صورت ترک‌های بزرگ‌تر به سطح سایش می‌رسند. با ادامه لغزش سطوح، ممکن است با جدا شدن ذراتی از محل این ترک‌ها، براده‌های سایشی ایجاد شوند. در غیر این صورت، با ورود ذرات موجود در سطح سایش به درون این ترک‌ها که در اثر شکستن جوش سطحی برآمدگی‌های سطحی پین و دیسک حاصل شده‌اند و در نتیجه، مخلوط شدن اجزای تشکیل دهنده‌ی پین و دیسک در ادامه‌ی عمل لغزش سطوح، لایه‌ای موسوم به لایه‌ی تریبولوژیکی روی سطح سایش تشکیل می‌شود. وقوع این مکانیزم، به میزان بار وارد شده به سطح و نیز سختی و استحکام ماده‌ی تحت سایش بستگی دارد. این موضوع را می‌توان با توجه به تصاویر داده شده در شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) به خوبی مشاهده نمود. همان‌گونه که در این تصاویر دیده می‌شود در بار وارده‌ی ۵N، حتی در آلیاژ زمینه هم تشخیص این لایه مشکل است و به بزرگ‌نمایی‌های بالاتری نیاز است. با افزایش بار وارده به تدریج مکانیزم یاد شده تشدید می‌شود. هر چند در نمونه‌های نانو کامپوزیتی نیز این مکانیزم حاکم است ولی به دلیل مقاوم‌سازی زمینه با نانو ذرات آلومینا و در نتیجه کاهش قابل توجه عمق ناحیه‌ی تغییر شکل یافته‌ی پلاستیکی، این مکانیزم سایش به صورت بسیار ملایم‌تری اتفاق می‌افتد (شکل ۸).

اضافه کردن ذرات سرامیکی سخت به عنوان مقاوم‌ساز به آلیاژهای آلومینیوم، زمینه‌ی آلومینیومی را از سایش



شکل ۷- نمودار تغییرات کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش برای آلیاژ زمینه و نانوکامپوزیت حاوی ۱٪ وزنی نانو ذرات آلومینا تحت بارهای اعمالی: الف) ۵N، ب) ۱۰N، ج) ۱۵N

جدول ۲- ضریب اصطکاک نمونه‌ها در بارهای اعمالی مختلف

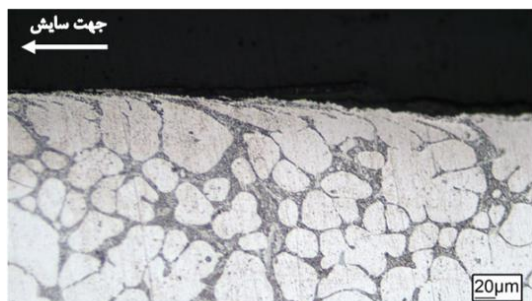
نمونه / بار اعمالی	۵N	۱۰N	۱۵N
A356	۰/۴۱	۰/۷۱	۰/۷۵
A356/1%Al ₂ O ₃	۰/۳۸	۰/۴۷	۰/۶۷

در حین انجام آزمون سایش، مقادیر ضریب اصطکاک در فاصله‌ی ۱۰۰۰m به دست آمد که میانگین ضریب اصطکاک برای نمونه‌ها در جدول (۲) داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضریب اصطکاک در هر دو مورد با افزایش نیرو افزایش یافته است. همچنین دیده می‌شود ضریب اصطکاک در نمونه‌ی نانوکامپوزیتی نسبت به نمونه تقویت نشده کمتر است. این روند در تغییرات ضریب اصطکاک ممکن است به دلیل تشکیل لایه‌ی مختلط مکانیکی حاوی ذرات مقاوم ساز در سطح باشد، که

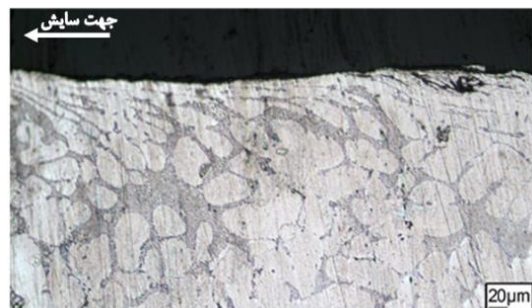
است. اما با افزایش بار اعمالی، نرخ سایش و سیلان نمونه بیشتر می‌شود و مواد موجود روی سطح کنده شده و منجر به تشکیل براده می‌شوند. در بارهای اعمالی بالاتر، سیلان پلاستیک نمونه به دلیل تولید حرارت بیشتر می‌شود [۱۷]. شکل (۹)، سیلان نمونه‌ی نانوکامپوزیتی را نشان می‌دهد. سیلان پلاستیکی نمونه‌ی نانوکامپوزیتی در مقایسه با نمونه‌ی تقویت‌نشده کمتر است. همچنین در خصوص نمونه‌ی کامپوزیتی در بارهای کمتر، یعنی ۵N سیلانی رخ نداده است، در حالی که در بارهای بیشتر، یعنی ۱۰N و ۱۵N، سیلان به‌وضوح قابل مشاهده است. حضور نانو ذرات تقویت‌کننده، سیلان پلاستیکی زمینه را محدود می‌کند [۱۹، ۱۸، ۱۱].



(الف)



(ب)



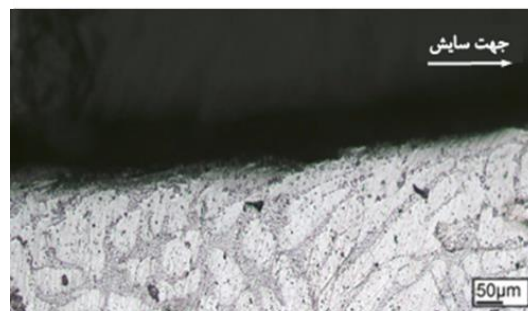
(ج)

شکل ۹- تصاویر نوری ریزساختار زیر سطح ساییده شده‌ی نمونه‌ی کامپوزیتی تحت بار: (الف) ۵N، (ب) ۱۰N، (ج) ۱۵N

محافظت می‌کند و کرنش برشی آلیاژهای تقویت نشده را به حداقل می‌رساند. این به خاطر این واقعیت است که نانوذرات Al_2O_3 به طور قابل توجهی سختی آلیاژ زمینه Al_2O_3 را افزایش داده است. در کامپوزیت، اتلاف ماده به دلیل تجمع نانوذرات Al_2O_3 روی سطح پس از بین رفتن آلیاژ با تأخیر مواجه می‌شود [۱۵].



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸- ریزساختار زیر سطح ساییده شده‌ی نمونه‌ی تقویت‌نشده تحت بار: (الف) ۵N، (ب) ۱۰N، (ج) ۱۵N

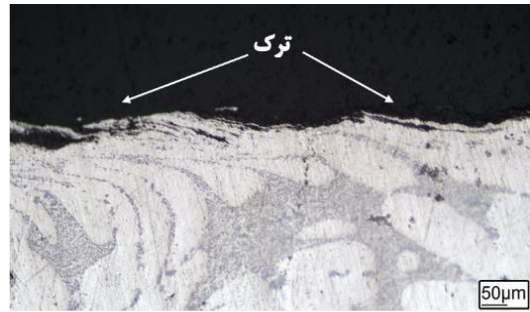
۳-۴- بررسی ریزساختار مناطق زیر سطح ساییده شده شکل (۸)، تصاویر نوری زیر سطح ساییده شده‌ی آلیاژ تقویت‌نشده را نشان می‌دهد. جهت سایش در این تصاویر نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است سیلان پلاستیک شدید در لبه‌های نمونه و زیر سطح سایش در جهت سایش رخ داده است. این سیلان در بارهای کم ملایم

۳- افزودن نانو ذرات آلومینا به آلیاژ زمینه موجب افزایش مقاومت سایشی نانو کامپوزیت در مقایسه با آلیاژ زمینه شد.

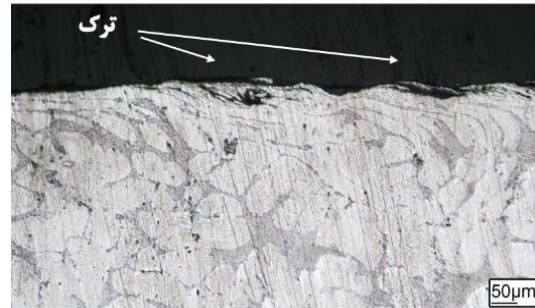
۴- مکانیزم احتمالی حاکم در فرآیند سایش آلیاژ زمینه و نانوکامپوزیت، سایش چسبان به همراه تشکیل لایه‌ی تریبولوژیکی بود. با این حال، به دلیل نقش مقاوم‌سازی ذرات آلومینا، این مکانیزم در نانوکامپوزیت با نرخ سایش بسیار کمتری در مقایسه با آلیاژ زمینه انجام شده است.

مراجع

- [1] Yang Y., Lan J., Li X., Study on bulk aluminum matrix nano-composite fabricated by ultrasonic dispersion of nano-sized SiC particles in molten aluminum alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 380, 378-383.
- [2] Rasidhar L., Krishna A. R., Rao C. S., Fabrication and Investigation on Properties of Ilmenite (FeTiO₃) based Al-Nanocomposite by Stir Casting Process, *International Journal of Bio-Science and Bio-Technology*, 2013, 5, 193-200.
- [3] Koli D. K., Agnihotri G., Purohit R., A review on properties, behaviour and processing methods for Al-nano Al₂O₃ composites, *Procedia Materials Science*, 2014, 6, 567-589.
- [4] Shabani M. O. Mazahery A., Aluminum-matrix nanocomposites: swarm-intelligence optimization of the microstructure and mechanical properties, *Materiali in tehnologije*, 2012, 46, 613-619.
- [5] Rana R. P. R. S., Soni S., Das S., Comparison of mechanical properties and microstructure of aluminum alloy micron and nano SiC composites fabricated by ultrasonic vibration, *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 2014, 1, 135-146.
- [6] Akbari M. K., Mirzaee O., Baharvandi H., Fabrication and study on mechanical properties and fracture behavior of nanometric Al₂O₃ particle-reinforced A356 composites focusing on the parameters of vortex method, *Materials & Design*, 2013, 46, 199-205.
- [7] Alpas A., Zhang J., Effect of microstructure (particulate size and volume fraction) and counterface material on the sliding wear resistance of particulate-reinforced aluminum matrix composites, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1994, 25, 969-983.
- [8] Surappa M., Prasad S., Rohatgi P.K., Wear and abrasion of cast Al-alumina particle composites, *Wear*, 1982, 77, 295-302.
- [9] Bindumadhavan P., Wah H.K., Prabhakar O., Dual particle size (DPS) composites: Effect on wear and mechanical properties of particulate metal matrix composites, *Wear*, 2001, 248, 112-120.
- [10] Tu J., Yang Y., Tribological behaviour of Al18B4O33-whisker-reinforced hypoeutectic Al-Si-Mg-matrix composites under dry sliding



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- ترک ایجاد شده روی سطح نمونه‌ی: (الف) آلیاژ A356، (ب) نانوکامپوزیتی تحت بار ۱۵ N

با توجه به نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر، در ارتباط با تعیین مکانیزم احتمالی حاکم بر فرآیند سایش مواد مورد بررسی، می‌توان گفت مکانیزم چسبان همراه با تشکیل لایه‌ی تریبولوژیکی (لایه‌ی مختلط متراکم شده‌ای از اجزای تشکیل دهنده‌ی پین و دیسک) کنترل کننده سایش این مواد است. با این حال، در نمونه‌ی نانو کامپوزیتی به دلیل اثر مقاوم‌سازی نانو ذرات آلومینا و در نتیجه محدود شدن سیلان پلاستیکی زمینه، نرخ سایش بر اساس مکانیزم یاد شده در مقایسه با آلیاژ زمینه (تقویت نشده)، به مراتب کمتر است.

۴- نتیجه‌گیری

- ۱- توزیع مناسب نانوذرات مقاوم‌ساز به دلیل انتخاب پارامترهای مناسب فرآیند از جمله سرعت و زمان هم‌زدن است. همچنین باید اشاره نمود که عملیات حرارتی نانو ذرات آلومینا، تأثیر به‌سزایی در ترشوندگی داشته است.
- ۲- با افزایش درصد وزنی نانو ذرات مقاوم‌ساز، تمایل به آگلومره شدن آن‌ها افزایش یافت که در نتیجه‌ی آن به دلیل حبس شدن گاز در این محل‌ها، میزان تخلخل از مقدار ۱/۳٪ به ۳/۲٪ افزایش یافت.

- conditions, Composites science and technology, 2000, 60, 1801-1809.
- [11] Rosenberger M. R., Forlerer E., Schvezov C., Wear behavior of AA1060 reinforced with alumina under different loads, *Wear*, 2009, 266, 356-359.
- [12] Sajjadi S. A., Ezatpour H., Beygi H., Microstructure and mechanical properties of Al-Al₂O₃ micro and nano composites fabricated by stir casting, *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528, 8765-8771.
- [13] Hashim J., Looney L., Hashmi M., Metal matrix composites: production by the stir casting method, *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 92, 1-7.
- [14] Mazahery A., Shabani M. O., Characterization of cast A356 alloy reinforced with nano SiC composites, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22, 275-280.
- [15] Akbari M. K., Baharvandi H., Mirzaee O., Nano-sized aluminum oxide reinforced commercial casting A356 alloy matrix: Evaluation of hardness, wear resistance and compressive strength focusing on particle distribution in aluminum matrix, *Composites Part B: Engineering*, 2013, 52, 262-268.
- [16] Nemati N., Khosroshahi R., Emamy M., Zolriasatein A., Investigation of microstructure, hardness and wear properties of Al-4.5 wt.% Cu-TiC nanocomposites produced by mechanical milling, *Materials & Design*, 32, 3718-3729, 2011.
- [17] Surappa M., Dry sliding wear of fly ash particle reinforced A356 Al composites, *Wear*, 2008, 265, 349-360.
- [18] Stachowiak G., Batchelor A.W., *Engineering Tribology*, Butterworth-Heinemann, 2013.
- [19] Mosleh-Shirazi S., Akhlaghi F., Li D.Y., Effect of SiC content on dry sliding wear, corrosion and corrosive wear of Al/SiC nanocomposites, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26, 1801-1808.