

مهندسی ساخت و تولید ایران www.smeir.org



بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت زمینه آلومینیمی 5456 تقویت شده با نانوذرات اکسید سیلیسیم تولید شده به روش فرایند همزن اصطکاکی

رسول نادری¹، مصطفی حاجیان حیدری^{2*}، محسن کریمی²، علیرضا احمدی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

2- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

3- كارشناس ارشد، مهندسي مواد، دانشگاه صنعتي اميركبير، تهران

* شاهرود، صندوق يستى hajian@shahroodut.ac.ir ،316

اطلاعات مقاله	چکیدہ
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 20 مهر 1398 پذیرش: 19 آذر 1398 ارائه در سایت: تیر 1399	فرایند همزن اصطکاکی یک روش حالتجامد برای اصلاح و همگنسازی موضعی ریزساختار و افزایش خواص مکانیکی فلزات است. در تحقیق حاضر، از این روش برای ایجاد کامپوزیت زمینه آلومینیمی 5456 تقویتشده با نانوذرات SiOz (یا میانگین اندازه ذره 20 نانومتر) استفاده شد. پارامترهای مورداستفاده شامل سرعت پیشروی ثابت 8 میلی متر بر دقیقه، سرعت دورانی 800 و 2500 دور بر دقیقه و مقدار ذرات تقویت کننده 5 و 15 درصد وزنی بود. ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی راکترونی رویشی موردیر سی قرار
کلیدواژگان: فرایند همزن اصطکاکی کامپوزیت زمینه آلومینیمی نانوذرات SiO ₂ ریزساختار خواص مکانیکی	گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزودن ذرات تقویت کننده، میانگین اندازه دانه در ناحیه همزده کاهش پیدا می کند. همچنین، مشاهده شد که اندازه دانههای منطقه همزده با افزایش سرعت دورانی کاهش می یابد. برای بررسی خواص مکانیکی، از آزمونهای ریزسختی و کشش استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت دورانی میزان سختی منطقه همزده از 80 به 170 ویکرز افزایش یافت. همچنین، نتایج آزمون کشش نشان داد که میزان استحکام با درصد کمتر ذرات تقویت کننده افزایش یافته و از 130 به 210 مگاپاسکال تغییر می کند.

Microstructure and mechanical properties of $AA5456/SiO_{2p}$ nanocomposite fabricated by friction stir processing

Rasoul Naderi¹, Mostafa Hajian Heidary^{1*}, Mohsen Karimi¹, Alireza Ahmadi²

1- Department of Materials Science and Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Department of Mining and Metallurgy Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 316 Shahrood, Iran, hajian@shahroodut.ac.ir

Article Information Abstract Original Research Paper Friction stir processing is a solid-state method used for local homogenization, grain structure refinement, and Received 12 October 2019 improvement of mechanical properties of metallic materials. Through this method, AA5456/SiO₂/5-15p Accepted 10 Desember 2019 nanocomposites were produced in the present research. The average particle size of the reinforcements was 20 Available July 2020 nm. The processing parameters included the constant traverse of 8 mm/min and rotational speeds of 800 and 2500 rpm. The microstructural examinations were carried out using the optical and scanning electron Keywords: microscopies. The results showed that the average grain size of the stir zone reduced by incorporation of the Friction Stir Processing reinforcing particles into the matrix. It was also observed that the increase in the rotational speed results in a Aluminum Matrix Composite Sio₂ Nanoparticles decrease in the grain size of the stir zone. The mechanical properties of the friction stir processed composites Microstructure were also evaluated by the microhardness and tensile testing. It was revealed that the microhardness is Mechanical Properties increased from 80 to 170 HV when the rotational speed increases. The tensile test results showed an improved strength from 130 to 210 MPa for samples with lower percentages of reinforcements.

1– مقدمه

آلیاژهای آلومینیمی معمولی دارای خواص سودمندی مانند وزن کم، سختی بالا و مقاومت سایش خوب هستند و ازاینرو کاربردهای گستردهای در صنایع مختلف پیدا کردهاند [2، 3]. نتایج نشان داده است که تقریباً در تمام موارد مقاومت به سایش نمونههای کامپوزیتی نسبت به نمونههای بدون ذرات

آلیاژهای آلومینیم برای کاربردهای مقاوم به سایش معمولاً بهاندازه کافی سخت نیستند و تقویت سطح آنها با روشهای کامپوزیتسازی یا پوششدهی الزامی است [1]. کامپوزیتهای زمینه آلومینیمی تقویتشده با ذرات سرامیکی نسبت به

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Rasoul Naderi, Mostafa Hajian Heidary, Mohsen Karimi, Alireza Ahmadi, Microstructure and mechanical properties of AA5456/SiO_{2p} nanocomposite fabricated by friction stir processing, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 4, pp. 39-47, 2020 (in Persian)

تقویت کننده بهبود چشمگیری مییابد که این افزایش مقاومت به افزایش سختی ناشی از ذرات تقویت کننده نسبت داده شده است؛ بااین حال، پراکندهسازی یکنواخت تقویت کنندهها در این نوع کامپوزیتها و بهطورکلی همه کامپوزیتهای زمینه فلزی، کاری بس دشوار است. تکنیکهای فراوری موجود برای ساخت کامپوزیتهای سطحی عموماً بر پایه فراوری فاز مایع در دماهای بالا استوار است. در سالهای اخیر، روشهای متفاوتی برای تولید کامپوزیتهای سطحی مطرح شدهاند که از آن جمله میتوان به ذوب سطحي با ليزر، پرتوافکني الکتروني، پرتوافکني پلاسمايي و ریخته گری اشاره کرد؛ اما این روش ها محدودیت هایی دارند که موجب كاهش استفاده از آنها می شود. مشكل اصلی این فرایندها حضور فاز مذاب در حین کامپوزیتسازی است. در این حالت امکان واکنش بین ذرات تقویت کننده و زمینه فلزی و تشکیل برخی فازهای مخرب وجود دارد. علاوهبراین، یکی از مشکلات عمده در کامپوزیتهای تولیدی با فرایندهای ذوبی، آگلومره شدن ذرات تقویت کننده بوده که به توزیع غیریکنواخت آنها در زمینه منجر میشود. در فرایندی مانند ریختهگری نیز ایجاد تخلخلها و حفرات انقباضی در نمونه اجتنابناپذیر است. بهمنظور ایجاد ریزساختار مناسب در حین انجماد باید کنترل بسیار دقیقی روی متغیرهای فرایند صورت پذیرد؛ بنابراین، واضح است که اگر تولید کامپوزیت سطحی در دمایی زیر نقطه

ذوب صورت گیرد، مشکلات فوق وجود نخواهد داشت [4]. امروزه فرایند همزن اصطکاکی (FSP) بهعنوان روشی برای بهبود ساختار سطحی شناخته شده است. در این فرایند یک ابزار غیرمصرفی با چرخش روی سطح فلز، باعث ایجاد تغییرشکل پلاستیک گرم شده که اصطلاحاً ناحیه همزده (SZ)² نامیده می شود. سپس، با پیشروی ابزار در طول نمونه، منطقهای وسیع دستخوش تغییرشکل قرار می گیرد. با وارد کردن فازهای تقويت كننده به منطقه همزده، كامپوزيت ايجاد مى شود. فرايند همزن اصطكاكي درواقع از توسعه جوشكاري همزن اصطكاكي (FSW)³ ایجاد شده است و کاملاً در حالتجامد انجام می شود. با در نظر گرفتن مشکلات عملیات ذوبی بهنظر میرسد که فرایند همزن اصطکاکی گزینه مناسبی برای ساخت کامپوزیتهای سطحی روی ورقهای آلومینیمی باشد. با توجه به اینکه در حین فرایند همزن اصطکاکی دما کمتر از نقطه ذوب فلز پایه است، لذا مشکلات ذکرشده در فرایندهای بر پایه فاز مذاب وجود نخواهند داشت. علاوهبراین، فرایند همزن اصطکاکی

سبب اصلاح ساختار و کاهش اندازه دانه در نزدیکی سطح ماده می شود که این امر خود به بهبود خواص مکانیکی، کاهش و توزيع مناسب تخلخلها ويرداخت سطحى بهتر منجر مىشود [5]. ریزساختار و خواص مکانیکی ناحیه همزده را می توان با کنترل متغیرهای فرایند، و عمق آن را با تغییر طول پین تغییر داد [6].

پژوهشهای مختلفی در زمینه فراوری همزن اصطکاکی آلیاژهای آلومینیمی انجام شده است. به عنوان مثال، میشرا و ما [7] به مطالعه گسترده فرایندهای FSP/FSW پرداختند و تأکید ویژهای بر تأثیر پارامترهای فرایند بر اصلاح ریزساختار و خواص مکانیکی نهایی آن داشتند. موریسادا و همکارانش [8]، پراکندگی فولرن را در زمینه آلیاژ آلومینیمی 5083 ازطریق فرايند همزن اصطكاكي با موفقيت انجام دادند. يراكندگي فولرن باعث افزایش اصلاح دانه توسط تبلورمجدد در طول FSP شد بهطورى كه اندازه دانه به 200 نانومتر رسيد. جريان مواد با توجه به پراکندگی فولرن بررسی شد و مشخص شد که مکانیسم شکل گیری منطقه همزده بهطور مستقیم با جریان مواد ناشی از شانه ابزار چرخشی ارتباط دارد. جریان ماده توسط شانه هنگام ساخت كامپوزيتهاى سطحى توسط FSP بەمنظور ايجاد پراکندگی یکنواخت از تقویت کننده بسیار مهم است. زادعلی و همكارانش [9] با استفاده از فرايند همزن اصطكاكي، بهصورت درجا كامپوزیت Al3003/Al₃Zr + Al₃Ti ساختند. نتایج آنها نشان داد که نمونههای کامپوزیت هیبریدی بهدلیل حضور تركيبات آلومينايدي سخت Al₃Zr و Al₃Ti ريزسختي و مقاومت به سایش بهمراتب بالاتری نسبت به زمینه تقویتنشده از خود نشان میدهند. علی دخت و همکارانش [10]، از فرایند همزن اصطکاکی، برای ترکیب ذرات SiC و MoS₂ در زمینه آلیاژ آلومينيمي A356 براى تشكيل كامپوزيت هيبريد سطحى و بهبود مقاومت به سایش استفاده کردند. تجزیهوتحلیلهای ریزساختاری آنها توزیع یکنواختی از ذرات تقویتکننده در ناحیه همزده و لایه مکانیکی غنیای از MoS₂ در بالای سطح سایشی را نشان داد. این لایه MoS₂ خواص تریبولوژیکی⁴ آلیاژ را بهبود بخشید. احمدی فرد و همکارانش [11] به مطالعه اثر نسبت ترکیبی گرافیت و زیرکونیا بر خواص آلومینیم FSP شده یرداختند و گزارش دادند که با افزایش درصد گرافیت نسبت به زیرکونیا مقاومت به سایش بهبود مییابد. آنها همچنین در تحقيقى ديگر [12] خواص مكانيكى كامپوزيت A356-TiO₂-Gr تولیدشده با فرایند همزن اصطکاکی را موردبررسی قرار دادند و

¹ Friction stir processing

Stir zone ³ Friction stir welding

⁴ Tribological

مهندسی ساخت و تولید ایران، تیر 1399، دوره 7 شماره 4

مشاهده کردند که ذرات TiO₂ باعث افزایش مقاومت به سایش کامپوزیت شده اما با اضافه کردن ذرات گرافیت ضریب اصطکاک کاهش پیدا می کند. شریفی تبار و همکارانش [13]، به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت سطحی AA5052/Al₂O₃ مریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت سطحی شده و اثر پاسهای فرایند بر روی این خواص را مطالعه کردند. نتایج نشان داده است که اندازه دانه در منطقه همزده با افزایش تعداد پاسهای فرایند همزن اصطکاکی کاهش یافت و متوسط اندازه ذرات در کامپوزیت ساخته شده توسط چهار پاس، زیر میکرون بوده است. همچنین افزایش تعداد پاسهای فرایند همزن اصطکاکی باعث توزیع بهتر ذرات Al₂O₃ در زمینه شده و نانوکامپوزیتی با میانگین اندازه دانه 70 نانومتر ساخته شد.

آلياژهای آلومينيمی سری 5xxx (با عنصر آلياژی اصلی منیزیم) در گروه آلیاژهای کاریذیر و عملیاتحرارتینایذیر آلومینیم دستهبندی می شوند که با توجه به نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت خوب در برابر خوردگی و قابلیت بازیافت، توجه زیادی را به خود جلب کردهاند. این آلیاژها سیستم عنصری ساده و خواص ناهمسانگردی ضعیفی دارند و خواص مکانیکی آنها بهطور عمده توسط اندازه دانه و کنترل چگالی نابجاییها تعیین مى شود [14]. بااين حال، استحكام و مقاومت سايشى اين آلياژها نسبتاً ضعيف است. تاكنون مطالعات محدودى درزمينه بهبود استحکام و مقاومت سایشی آلیاژهای سری 5xxx ازطریق كامپوزيتسازى سطحى صورت پذيرفته است كه در بالا به برخى از آنها اشاره شد اما گزارشی مبنیبر بهبود خواص مکانیکی آلیاژ 5456 با استفاده از فرایند همزن اصطکاکی انجام نشده است؛ در پژوهش حاضر، تلاش شد با استفاده از فرایند همزن اصطكاكى، نانوذرات اكسيد سيليسيم (SiO₂) بەعنوان فاز تقويت كننده به سطح آلياژ آلومينيمي 5456 وارد شود و ريزساختار و تغييرات سختى و استحكام اين نانوكامپوزيت جدید موردبررسی قرار گیرد.

2- مواد و روش آزمون

فلز پایه مورداستفاده در این پژوهش، ورق آلیاژ آلومینیم 5456 تابکاری شده به ضخامت 5 میلی متر بود که ترکیب شیمیایی آن در جدول 1 ارائه شده است. نمونه های اولیه فلز پایه برای انجام فرایند همزن اصطکاکی و تولید نانوکامپوزیت سطحی، به صورت مستطیل هایی به ابعاد 120×60 میلی متر بریده و آماده شدند. ماده تقویت کننده برای ایجاد نانوکامپوزیت سطحی، نانوذرات اکسید سیلیسیم (SiO₂) (ساخت شرکت Merck آلمان) با

خلوص 99/99 درصد و میانگین اندازه ذره 20 نانومتر بود. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نانوذرات SiO₂ به کاررفته در شکل 1 نشان داده شده است. ابزار مورداستفاده از فولاد گرمکار H13 با سختی 56 راکول سی ساخته شد. شکل 2 تصویری از ابزار ساخته شده با پین مربعی را نشان می دهد.

جدول 1 ترکیب شیمیایی فلز پایه برحسب درصد وزنی

Table 1 Chemical composition of the base alloy (wt. %)							
Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0/40	0/10	0/80	5/1	0/12	0/25	0/20	مابقى



Fig. 1 The SEM micrograph of SiO₂ nanoparticles used in this paper **شکل 1** تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نانوذرات SiO₂ به کار رفته در این پژوهش



Fig. 2 The tool used in this research was made of H13 steel شکل **2** تصویر ابزار مورداستفاده ساختهشده از فولاد H13

دلیل انتخاب پین مربعی شکل، تجربه به دست آمده در حین پژوهش بود زیرا با پینهای با اشکال مختلف (استوانهای ساده و استوانهای روزهدار) نتایج مطلوبی حاصل نشد؛ بنابراین، بهمنظور افزایش بازدهی در عملیات اختلاط، پین بهصورت مربعی تراشكارى شد. قطر و ارتفاع پين بهترتيب 5 و 3/6 ميلىمتر و قطر شانه ابزار 16 میلیمتر بود. در هنگام کار، زاویه انحراف ابزار نسبت به راستای عمود بر ورق 3 درجه تنظیم شد. در این تحقیق، سرعت پیشروی نسبتاً کم 8 میلیمتر بر دقیقه ثابت درنظر گرفته شد و آزمونها در سرعتهای چرخش مختلف 800 و 2500 دور بر دقيقه انجام شد تا سرعت بهينه از نظر حصول نمونه سالم و بدون عيوب ظاهري تعيين گردد. شكل 3 نمايي از روش انجام فرایند همزن اصطکاکی را نشان میدهد. برای انجام عملیات کامپوزیتسازی، ابتدا شیاری به عرض 4 میلیمتر در سرتاسر طول نمونهها ایجاد شد و سیس نانوذرات SiO₂ که با نسبتهای جرمی 5 و 15 درصد وزنی (نسبت به فلز پایه) با اتانول مخلوط شده و بهصورت خمیری درآمده بودند، داخل شیار قرار داده شدند. در جدول 2 شرایط نمونهها برای سهولت ارجاع نامگذاری شده است. بعد از انجام فرایند، سطح مقطع نمونههای کامپوزیتی شده متالوگرافی و با محلول پولتون (جدول 3) حککاری شدند و ریزساختار آنها توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی موردمطالعه گرفت. همچنین، برای بررسی خواص مکانیکی نمونهها، آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM E8 و ریزسختی سنجی ویکرز براساس استاندارد ASTM E308 (تحت بار 50gf و زمان 10s) انجام شد.



Fig. 3 Schematic representation of the friction stir processing [10] شکل **3** نمایی از فرایند همزن اصطکاکی [10]

جدول 2 نامگذاری نمونهها براساس پارامترهای فرایند

Table 2 Samples designation based on the processing parameters					
کد نمونه	سرعت پیشروی	سرعت دورانی	درصد وزنی ذرات		
	(mm/min)	(rpm)	تقويت كننده		
8-2500-5	8	2500	5		
8-2500-15	8	2500	15		
8-800-15	8	800	15		

(mL جدول **8** ترکیب شیمیایی محلول حککاری پولتون (برحسب **Table 3** Chemical composition of Poulton's etchant (mL)

HCl	HNO ₃	HF	H_2O
60	30	5	5

3- نتايج و بحث

3-1- بررسیهای ریزساختاری

شکل 4 تصویر میکروسکوپی نوری از منطقه همزده و ناحیه مجاور آن را در یکی از نمونههای FSP شده نشان میدهد. تغییر ساختار و ایجاد نواحی مختلف در مقاطع عرضی نمونهها بهعلت وجود اختلاف در مقدار تغییرشکل پلاستیک و میزان حرارت ورودی در این نواحی است [15]. در ناحیه همزده به سبب ایجاد تغییرشکل پلاستیک شدید و افزایش دما، تبلورمجدد دینامیکی اتفاق میافتد و ریزساختاری حاوی دانههای ریز و هم محور ایجاد میشود [16] اما در ناحیه مجاور منطقه همزده، موسوم به منطقه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی (TMAZ)¹، بهعلت تغییرشکل کمتر و دمای پایینتر میزان پیشرفت تبلورمجدد کمتر بوده و این امر باعث ایجاد ساختار درشتتر و کشیدهتری در این ناحیه نسبت به ناحیه همزده میشود [17].

در شکل 5- الف تصویر ریزساختار میکروسکوپی نوری از منطقه همزده و منطقه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی نمونهای نشان داده شده است که با 5 درصد وزنی ذرات تقویتکننده تحت سرعت پیشروی 8 میلیمتر بر دقیقه و سرعت دورانی 2500 دور بر دقیقه کامپوزیتسازی شده است.

شکل 5- ب تصویر میکروسکوپی نمونهای با 15 درصد وزنی ذرات تقویتکننده را نشان میدهد که با شرایط مشابهی فراوری شده است.



Fig. 4 OM micrographs from the interface of SZ and TMAZ و Fig. 4 OM micrographs from the interface of SZ and TMAZ شكل 4 تصوير ناحيه مرزى SZ و

¹ Thermomechanically affected zone

مهندسی ساخت و تولید ایران، تیر 1399، دوره 7 شماره 4



ریزساختار نمونه کامپوزیتی شده با 15 درصد وزنی ذرات تقویت کننده تحت سرعت پیشروی 8 میلی متر بر دقیقه و سرعت دورانی 800 دور بر دقیقه در شکل 5- ج نشان داده شده است. هدف از این مقایسه، بررسی تأثیر درصد ذرات تقویت کننده و سرعت دورانی بر اندازه دانه منطقه کامپوزیتی شده است. همان طور که مشاهده می شود، در سرعت پیشروی ثابت، با افزایش سرعت دورانی دانهها ریز شده اند. با افزایش سرعت دورانی از یک سو میزان حرارت ورودی کل و از سوی دیگر، میزان حرارت ناشی از تغییر شکل اعمالی افزایش پیدا می کند. نکته جالب توجهی که در این نمونهها مشاهده شد این بود که منطقه متأثر از حرارت (HAZ) در این نمونهها تشکیل نشده است زیرا هیچ شواهدی مبنی بر افزایش اندازه دانه بلافاصله بعد از منطقه ZMAT و قبل از فلز پایه (BM) مشاهده

نگردید. سرعت پیشروی کم میتواند فرصت بیشتری را برای همگنسازی فراهم آورد. اصلاح اندازه دانه در آلومینیم و آلیاژهای آن اغلب با مکانیسم تبلورمجدد دینامیکی پیوسته یا تبلورمجدد دینامیکی هندسی رخ میدهد. لذا اعمال کرنشهای بزرگ در ناحیه همزده باعث پیشرفت بیشتر فرآیند تبلورمجدد و ریزتر شدن ساختار دانهبندی میشود. در این زمینه تحلیلهای مشابهی در خصوص تحولات ریزساختاری در خلال عملیات فراوری آلومینیم و آلیاژهای آن توسط محققان دیگر ارائه شده است [17]. توزیع یکنواختی از ذرات تقویتکننده پس از یک پاس عملیات تأثیر خوبی بر کاهش اندازه دانه و درنتیجه بهبود به توزیع یکنواخت ذرات در منطقه همزده منجر میشود.

در شکل 6 تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از منطقه همزده نمونههای مختلف نشان داده شده است.



Fig. 6 SEM micrographs of the stir zone for sample (a) 8-2500-5, (b) 8-2500-15 and (c) 8-800-15

شکل 6 تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از منطقه همزده نمونههای (الف) 5-800-8. (ب) 15-800-8

15.3 K 13.6 K 11.9 K همانطور که مشاهده میشود با افزایش سرعت دورانی در سرعت پیشروی ثابت، اندازه ذرات تقویت کننده کوچک میشوند. در شکلهای 6- الف و ب میزان ذرات تقویت کننده به تر تیب 5 و 15 درصد وزنی بوده که بهخوبی در زمینه پراکنده شدهاند. متوسط اندازه ذرات تقویت کننده در نمونه مربوط به شکل 6 (الف) حدود 40 نانومتر و در نمونه مربوط به شکل 6- ب حدود (الف)) حدود 40 نانومتر و در نمونه مربوط به شکل 6- ب حدود درات اولیه است. همچنین، مشخص است که با افزایش ذرات تقویت کننده، هنوز توزیع خوبی از آنها وجود دارد. در شکل 6 (ج) مقدار ذرات تقویت کننده 15 درصد وزنی بوده است. پراکندگی ذرات در زمینه بدون هیچ عیبی بوده و اندازه ذرات پراکندگی ذرات در زمینه بدون هیچ میبی بوده و اندازه ذرات پراکندگی ذرات در زمینه بدون هیچ میبی بوده و اندازه ذرات پراکندگی درات در زمینه بدون میچ میبی بوده و اندازه درات

پلاستیک در انجام فرایند که باعث ریز شدن دانههای زمینه میشود، موجب توزیع یکنواخت ذرات در زمینه هم میگردد. در طول فرایند همزن اصطکاکی، فلز میتواند بهدلیل حرارت بالای زمینه، تغییرشکل داده و جریان یابد. با توجه به آنالیز EDS در شکل 7 که از رسوباتی در منطقه همزده گرفته شده، مشاهده میشود که ترکیب شیمیایی آنها دارای 90-82 درصد وزنی آلومینیم و 7-5 درصد وزنی منیزیم است که با ترکیب شیمیایی فاز بینفلزی Al₁₂Mg₁₇ (γ) در دیاگرام فازی M-IA (شکل 8) سازگاری خوبی دارد؛ بنابراین، میتوان نتیجه گرفت که رسوبات سازگاری خوبی دارد؛ بنابراین، میتوان نتیجه گرفت که رسوبات اکسید سیلیسیم بهعنوان تقویتکننده در زمینه استفاده شده، درصدی سیلیسیم هم در آنها یافت شده است.





8.5 10.2

Energy (KeV)

11.9 13.6

Weight %

Net Int



15.3

3.4 5.1 6.8

0.0 1.7



 Fig. 9 Microhardness profile from the stir zone of the composite samples (a) 8-2500-5, (b) 8-2500-15 and (c) 8-800-15

 دمودار سختی نمونه های کامپوزیتیشده (الف) 8-2500-5, (b) 8-2500-5, (c) 8-2500-15

(ب) 8-2500-15 و (ج) 8-800-15

همان طور که قبلاً اشاره شد، اندازه دانهها در منطقه TMAZ كشيده مى شوند ولى هنوز مقدارى كرنش پلاستيك ذخيره شده دارند. به همین علت شاهد کاهش جزئی سختی در مجاورت منطقه همزده هستيم. همچنين مشاهده مي شود كه تفاوت سختی چندانی در طرف پیشرونده (AS) و طرف پسرونده (RS) وجود ندارد. بهدلیل اینکه منطقه متأثر از حرارت (HAZ) تغییرشکل پلاستیکی را تجربه نمی کند، ذرات تقویت کننده در آن حضور ندارند، معمولاً درشتدانه است و حتى ممكن است در حین FSP تنش زدایی شود، سختی باید در این ناحیه افت پیدا کند؛ اما همانطور که از نمودار سختی مشاهده میشود، چنین افت سختیای درست قبل از فلز پایه وجود ندارد؛ بنابراین، مطابق با مشاهدات ریزساختاری در نمونههای مورد ارزیابی، منطقه HAZ تشكيل نشده است. همچنين مشاهده مي شود كه بیشترین سختی به نمونهای مربوط است که بیشترین سرعت دورانی را تجربه کرده است که این خود نشاندهنده اهمیت بیشتر آهنگ تغییرشکل (نسبت به دما) بر ریزساختار دانهبندی منطقه همزده است.

3-3- آزمون کشش

نتایج آزمون کشش نمونههای کامپوزیتی شده در شکل 10 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود نمونه کامپوزیتی شده با 5 درصد ذرات وزنی تقویت کننده و بالاترین سرعت دورانی (5-2500-8)، بیشترین استحکام را نسبت به سایر نمونه ها داشته است. با افزایش درصد وزنی فاز تقویت کننده سایر نمونه ها داشته است. با افزایش درصد وزنی فاز تقویت کنده در همان سرعت دورانی (15-2500-8) استحکام مقداری کاهش یافته است. همچنین، استحکام نمونه کامپوزیتی شده با 15 درصد ذرات تقویت کننده و سرعت دورانی پایین تر (15-800-8) نسبت به سایر نمونه ها کمتر بوده است.



Fig. 8 Al-Mg binary phase diagram [18] شکل **8** نمودار فازی آلومینیم - منیزیم [18]

(a) Tetragona

3-2- آزمون سختی سنجی

شکل 9 نتایج اندازه گیری ریزسختی ویکرز لایه کامپوزیتی Al5456/SiO2 را نشان مىدهد. ريزسختىسنجى ويكرز مؤثرترین آزمون جهت بررسی تغییرات خواص مکانیکی ناشی از تغییرات ریزساختاری در طی عملیات فراوری در نواحی مختلف نمونه است زیرا با این روش میتوان سختیهای موضعی با فواصل میکرونی را از نرمترین تا سختترین قسمتهای نمونه بهدقت اندازه گیری کرد. تفاوت سختی در مناطق مختلف نمونههایی که با روش فرایند همزن اصطکاکی کامپوزیتی می شوند، علاوه بر توزیع ذرات به ماهیت ساختار دانهبندی این مناطق نیز بستگی دارد. در منطقه همزده بهدلیل وقوع تبلورمجدد دینامیکی، ساختاری کاملاً هممحور، در منطقه مجاور این منطقه که به TMAZ موسوم است، ساختاری کشیده و در منطقه فلز پایه مجدداً ساختار دانهبندی هممحور مشاهده می شود. نیمرخ سختی نشان میدهد که سختی در منطقه همزده (SZ) بسیار بیشتر از فلز پایه (BM) است. علت این امر را می توان به (1) توزیع نانوذرات SiO2 بهعنوان فاز سخت در زمينه آلومينيمي، (2) اصلاح اندازه دانههاي فلز پايه در منطقه همزده و (3) تفاوت در سرعت سرد شدن فاز تقویت کننده و زمینه نسبت داد. رسول نادری و همکاران

بود که با 5 درصد وزنی تقویتکننده در سرعت دورانی 2500 دور بر دقیقه کامپوزیت سازی شده بود.

5- مراجع

- P. Cavaliere, Mechanical properties of friction stir processed 2618/Al₂O₃/20p metal matrix composite, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 36, No. 12, pp. 1657-1665, 2005.
- [2] J. Stephens, High temperature metal matrix composites for future aerospace systems, 24th Joint Propulsion Conference, 1987.
- [3] B. W. Ahn, D. H. Choi, Y. H. Kim, S. B. Jung, Fabrication of SiC_p/AA5083 composite via friction stir welding, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, Supplement 3, No. 0, pp. s634-s638, 2012.
- [4] M. Gui, S. Bong Kang, Dry sliding wear behavior of plasma-sprayed aluminum hybrid composite coatings, *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, Vol. 32, pp. 2383-2392, 2001.
- [5] R. Mishra, M. W. Mahoney, Friction stir processing: a new grain refinement technique to achieve high strain rate superplasticity in commercial alloys, *Materials Science Forum*, Vol. 357, pp. 507-514, 2001.
- [6] D. Khayyamin, A. Mostafapour, R. Keshmiri, The effect of process parameters on microstructural characteristics of AZ91/SiO₂ composite fabricated by FSP, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 559, pp. 217-221, 2013.
- [7] R. S. Mishra, Z. Y. Ma, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering: R*, Vol. 50, No. 1–2, pp. 1-78, 2005.
- [8] Y. Morisada, H. Fujii, T. Nagaoka, K. Nogi, M. Fukusumi, Fullerene/A5083 composites fabricated by material flow during friction stir processing, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, No. 10, pp. 2097-2101, 2007.
- [9] M. Zadali, K. Ranjbar, Effect of heat treatment on microstructure and wear behavior of in-situ formed Al3003/Al₃Zr + Al₃Ti composite fabricated via friction stir processing, *Journal of Science and Technology of Composites* (in Persian (فارسی))
- [10]S. A. Alidokht, A. Abdollah-zadeh, S. Soleymani, H. Assadi, Microstructure and tribological performance of an aluminium alloy based hybrid composite produced by friction stir processing, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 5, pp. 2727-2733, 2011.
- [11]S. Ahmadifard, M. Roknian, T. Tinati Seresht, S. Kazemi, Fabrication of hybrid nanocomposite Al2024/Gr/Zro₂ via FSP and evaluation effect role of hybrid ratio in mechanical and wear properties, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 119-126, 2016. (in Persian نارسی)





Fig. 10 Results of tensile test for samples with different rotational speeds and amount of reinforcement شکل 10 منحنی تنش _ کرنش چند نمونه کامپوزیتیشده با درصد ذرات تقویت کننده و سرعتهای دورانی مختلف

هرچند انتظار می رفت با افزایش مقدار ذرات تقویت کننده، استحكام نمونه افزايش يابد اما كاهش استحكام نمونههاي كاميوزيتى شده با درصد ذرات تقويت كننده بيشتر (يعنى نمونههای 15-2500-8 و 15-800-8) مشاهده شد که این را می توان به عدم سیلان کافی ماده در زمینه و چسبنگی نسبتاً ضعيف ذرات تقويت كننده و زمينه نسبت داد كه درنهايت به ازبين رفتن خواص كششى كاميوزيت منجر مى گردد [19، 20]. همچنین، هرچه دمای ایجادشده حین فرایند بالاتر باشد احتمال تشکیل فازهای مضر ایجادشده حین و پس از فرایند نیز بیشتر می شود که این خود می تواند باعث افت خواص مکانیکی شود. شکست در برخی نمونهها از منطقه متأثر از عملیات ترمومکانیکی رخ دادہ است که علت آن کم بودن میزان استحکام در این مناطق می باشد. از طرفی، در داخل زمینه رسوبات $Al_{12}Mg_{17}$ وجود دارد که امکان حل شدن در منطقه, همزده را ندارند. همین رسوبات امکان دارد در اثر توزیع در زمينه نقش تقويت كننده را ايفا كنند و استحكام را بالا بيرند.

4- نتيجهگيرى

در این پژوهش، کامپوزیت زمینه آلومینیمی 5456 تقویتشده با نانوذرات SiO₂ به روش فرایند همزن اصطکاکی با موفقیت ساخته شد و اثر پارامترهای سرعت دورانی و درصد فاز تقویت کننده بر ویژ گیهای ریزساختاری و خواص مکانیکی آن موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار ذرات تقویت کننده و افزایش سرعت دورانی، مقدار سختی در منطقه همزده افزایش مییابد. همچنین مشاهده شد که فاز بینفلزی Al₁₂Mg₁₇ نیز در حین فرایند در منطقه همزده تشکیل می گردد. بیشترین استحکام کششی حاصل مربوط به نمونهای parameters on microstructural and mechanical properties of Al5052/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing, *Materials & Design*, Vol. 37, No. 0, pp. 458-464, 2012.

- [17]Z. Zhang, D. L. Chen, Contribution of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 483-484, pp. 148-152, 2008.
- [18]ASM Handbook. Volume 3, Alloy Phase Diagrams, Metals Park, Ohio :ASM International, 1989.
- [19]M. Barmouz, K. Besharati Givi, S. Javad, On the role of processing parameters in producing Cu/SiC metal matrix composites via friction stir processing: investigating microstructure, microhardness, wear and tensile behavior, *Materials Characterization*, Vol. 62, pp.108–17, 2011.
- [20]M. Barmouz, P. Asadi, K. Besharati Givi, Taheri shargh, Investigation of mechanical properties of Cu/SiC composite fabricated by FSP: effect of SiC particles' size and volume fraction, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp.1740–9, 2011.

- [12]S. Ahmadifard, M. Roknian, F. Khodaee, A. Heidarpour, Fabrication and investigation of microstructure and mechanical properties of A356-TiO₂-Gr surface hybrid nanocomposite by friction stir processing, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 1, pp. 61-68, 2018. (in Persian فارسى)
- [13]M. Sharifitabar, A. Sarani, S. Khorshahian, M. Shafiee Afarani, Fabrication of 5052Al/Al₂O₃ nanoceramic particle reinforced composite via friction stir processing route, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 8–9, pp. 4164-4172, 2011.
- [14]F. Ozturk, S. Toros, S. Kilic, Evaluation of tensile properties of 5052 type aluminum-magnesium alloy at warm temperatures, *Archives of Materials Science* and Engineering, Vol. 34, No. 2, pp. 95-98, 2008.
- [15]Y. Mazaheri, F. Karimzadeh, M. H. Enayati, A novel technique for development of A356/Al₂O₃ surface nanocomposite by friction stir processing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 10, pp. 1614-1619, 2011.
- [16]A. Dolatkhah, P. Golbabaei, M. K. Besharati Givi, F. Molaiekiya, Investigating effects of process