مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1395، دوره 16، شماره 10، ص‌ص 335-342

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تولید و مشخصه‌یابی کامپوزیت A356 تقویت‌شده با ذرات نانو و میکرومتری SiC به روش ریخته‌گری گردابی

کمال عموری[1]، جمال عموری[2]، سعید احمدی فرد[1]، مهدی کزازی[3*]، شهاب کاظمی[4]

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
2- فارغ التحصیل کارشناسی، مهندسی مواد، دانشکده شهید صدوقی، یزد
3- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه ملایر، ملایر
4- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
* ملایر، کد پستی 65719-95863، m_kazazi@malayeru.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 06 مرداد 1395
پذیرش: 30 مرداد 1395
ارائه در سایت: 24 مهر 1395

کلید واژگان:
ریخته‌گری گردابی
عملیات حرارت T6
ریزساختار
ذرات SiC
سختی و استحکام فشاری

چکیده

در این پژوهش کامپوزیت‌های زمینه آلیاژ آلومینیم A356 تقویت‌شده با درصدهای وزنی مختلف از نانوذرات و ذرات میکرومتری کاربید سیلیسیم به ترتیب با میانگین اندازه 50 نانومتر و 5 میکرومتر توسط روش ریخته‌گری گردابی تولید شد. با توجه به نقش عملیات حرارتی T6 بر روی افزایش استحکام و سختی آلیاژ A356، کامپوزیت‌های به‌دست‌آمده تحت عملیات حرارتی T6 قرار داده شدند. سختی و خواص فشاری نمونه‌های کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفت. میکروساختار نمونه‌ها نیز توسط میکروسکوپ‌های نوری، الکترونی روبشی و الکترونی گسیل میدانی بررسی شد. بررسی ریزساختاری نشان داد که انجام عملیات حرارتی T6 باعث تغییر در مورفولوژی سیلیسیم یوتکتیک شده و طی مرحله پیرسازی رسوب مستحکم Mg_2Si در ساختار ایجاد می‌شود که باعث افزایش سختی و استحکام فشاری آلیاژ شده است. نتایج نشان داد که با افزایش درصد وزنی نانوذرات، سختی واستحکام فشاری افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از ریزساختار نمونه‌ها، توزیع نسبتا یکنواختی را از ذرات تقویت‌کننده نشان داد. همچنین استحکام و سختی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانوذرات بیشتر از کامپوزیت تقویت‌شده با ذرات میکرومتری با وجود درصد وزنی بالاتر بود. میزان سختی و استحکام فشاری در کرنش 35 درصد کامپوزیت عملیات حرارتی شده و تقویت‌شده با 1.5 درصد وزنی نانوذرات به ترتیب 62 برینل و 252 مگاپاسکال نسبت به آلیاژ پایه ریختگی بهبود یافته است.

Preparation and characterization of A356 composite reinforced with SiC nano- and microparticles by stir casting method

Kamal Amouri[1], Jamal Amouri[2], Saeed Ahmadifard[1], Mahdi Kazazi[3*], Shahab Kazemi[1]

1- Department of Materials Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
2- Department of Materials Engineering, College of Shahid Sadoughi, Yazd, Iran.
3- Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.
* P.O.B. 65719-95863 Malayer, Iran, m_kazazi@malayeru.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 27 July 2016
Accepted 20 August 2016
Available Online 15 October 2016

Keywords:
Stir casting
T6 heat treatment
Microstructure
SiC particles
Hardness and Compressive strength

ABSTRACT

In this study, A356 aluminum alloy matrix composites reinforced with different weight percentages of SiC nano- and microparticles respectively with 50 nm and 5 µm average particle sizes were fabricated by stir casting method. Due to the effect of T6 heat treatment on the strength and hardness of A356 alloy, the obtained composites were subjected to the T6 heat treatment. The mechanical properties such as hardness and compressive properties of the composites were investigated. Microstructures of the samples were also investigated by an optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and field emission scanning electron microscope (FESEM). Microstructural investigation indicated that T6 heat treatment led to the change of eutectic silicon morphology and formation of the Mg2Si precipitates during age hardening stage, leading to increased hardness and compressive strength. The results showed that an increase in wt.% of nanoparticles leading to increased hardness and compressive strength. The results of microstructural investigation showed the relatively uniform distribution of reinforcement particles. Also, the strength and hardness of the composites reinforced with nanoparticles were greater than those of the composite reinforced with microparticles, even with higher weight percent of reinforcement particles. Hardness and compressive strength at 35% strain for the composite reinforced with 1.5 wt.% nanoparticles were respectively obtained 62 HBN and 252MPa, which are improved compared to the base alloy.

1- مقدمه

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

K. Amouri, J. Amouri, S. Ahmadifard, M. Kazazi, Sh. Kazemi, Preparation and characterization of A356 composite reinforced with SiC nano-and microparticles by stir casting method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 335-342, 2016 (in Persian)

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.51.2]

آلیاژ A356 یک آلیاژ ریخته‌گری بوده که شامل آلومینیم، سیلیسیم و منیزیم است. این آلیاژ دارای استحکام و شکل‌پذیری خوب به همراه خواص ریخته‌گری عالی، مقاومت به خوردگی بالا و سیالیت خوب است. این آلیاژ به‌طور گسترده‌ای در صنایع ماشین‌سازی، هواپیماسازی، صنایع دفاعی و به ویژه در صنایع خودروسازی به‌جای اجزای فولادی استفاده می‌شود. سیلیسیم یوتکتیک اصلاح‌نشده در آلیاژ A356 به‌صورت ساختاری درشت و بشقابی شکل حضور داشته که خواص مکانیکی آلیاژ (به‌خصوص شکل‌پذیری) را کاهش می‌دهد. بااین‌حال خواص مکانیکی آن می‌تواند توسط عملیات حرارتی مناسب و به‌خصوص استفاده از عملیات حرارتی T6 به‌طور قابل‌توجهی بهبود یابد [1-3].

در کامپوزیت‌های زمینه فلزی، آلیاژ نسبتا نرم مانند آلومینیم را می‌توان با استفاده از ذرات سرامیکی سخت و شکننده معمول مانند کاربید سیلیسیم، اکسید آلومینیم و کاربید بر مستحکم نمود [4]. کامپوزیت زمینه آلومینیم تقویت‌شده با ذرات کاربید سیلیسیم در چند دهه اخیر با توجه به خواص عالی مانند وزن سبک، استحکام بالا، مقاوم به سایش، ضریب انبساط حرارتی کم و تنوع روش‌های موجود برای ساخت آن‌ها بسیار موردتوجه قرار گرفته‌اند [5].

معمولا استفاده از ذرات سرامیکی در ابعاد میکرومتری باعث بهبود در استحکام تسلیم و استحکام کششی فلز می‌شود ولی شکل‌پذیری کامپوزیت زمینه فلزی با افزایش درصد ذرات سرامیکی کاهش می‌یابد. به همین دلیل از ذرات سرامیکی در ابعاد نانومتری به‌منظور جلوگیری از کاهش انعطاف‌پذیری به‌جای ذرات میکرومتری استفاده می‌شود. همچنین استفاده از نانوذرات به‌طور قابل‌توجهی باعث بهبود خواص مکانیکی زمینه نسبت به ذرات میکرومتری می‌شود [3].

فرآیند ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینمی شامل روش‌های حالت مایع، نیمه جامد و متالورژی پودر است. ریخته‌گری گردابی یک روش حالت مایع تولید کامپوزیت است که در آن ذرات سرامیکی به‌وسیله یک همزن مکانیکی در مذاب توزیع می‌شوند. مذاب آماده‌شده با ذرات سرامیکی می‌تواند برای ریخته‌گری تحت‌فشار، ریخته‌گری با قالب‌های دائمی یا ریخته‌گری ماسه‌ای استفاده شود. ریخته‌گری گردابی برای تولید کامپوزیت‌هایی تا حدود 30 درصد حجمی تقویت‌کننده مناسب است [7,6]. این فرآیند حالت مایع نسبت به سایر روش‌های دیگر برای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی، مقرون به‌صرفه‌تر بوده و اجازه ساخت قطعات در ابعاد بزرگ را می‌دهد [8]. در تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی به روش ریخته‌گری گردابی، عوامل متعددی که نیاز به توجه دارند، شامل موارد زیر می‌باشد [9]:

1- مشکل رسیدن به توزیع یکنواخت مواد تقویت‌کننده.
2- تر شوندگی بین مواد تقویت‌کننده و فلز مذاب.
3- تخلخل در کامپوزیت‌های زمینه فلزی ریختگی.
4- واکنش شیمیایی بین مواد تقویت‌کننده و آلیاژ زمینه.

به‌طورکلی تر شوندگی ذرات سرامیکی در فلز مذاب کم است. تر شوندگی خوب باعث ایجاد پیوند قوی بین زمینه و ذره می‌شود. تکنیک‌های مختلفی برای افزایش تر شوندگی ذرات وجود دارد که شامل پیش گرم کردن ذرات، اضافه کردن عناصری مانند منیزیم و لیتیوم به زمینه، پوشش یا اکسیداسیون ذرات سرامیکی، تمیز کردن سطح ذرات به‌وسیله امواج فراصوتی و اچ کردن وجود دارد. پیش گرم کردن ذرات سرامیکی مانند کاربید سیلیسیم منجر به حذف ناخالصی‌های سطحی و دفع گازها و تغییر در ترکیب شیمیایی سطح به دلیل ایجاد یک لایه اکسیدی روی سطح ذرات می‌شود که ایجاد لایه اکسیدی باعث بهبود تر شوندگی ذرات با فلز مذاب می‌شود [11,10].

تحقیقاتی در رابطه با تأثیر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم انجام شده است. در کامپوزیت A356–10%SiC، نمونه‌های عملیات حرارتی شده در مقایسه با نمونه‌های ریختگی سختی و استحکام بیشتری را از خود نشان دادند [3]. سجادی و همکاران کامپوزیت زمینه آلومینیم تقویت‌شده با ذرات اکسید آلومینیم به روش ریخته‌گری گردابی تولید نمودند و نشان دادند که افزودن ذرات تقویت‌کننده باعث افزایش استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و استحکام فشاری و همچنین باعث افزایش سختی می‌شود [12]. راوی و همکاران نشان دادند که افزودن ذرات تقویت‌کننده کاربید بر به زمینه آلومینیم باعث افزایش سختی و استحکام کششی می‌شود. کامپوزیت به روش ریخته‌گری گردابی تولید شده و همچنین افزودن ذرات تقویت‌کننده باعث کاهش اندازه دانه زمینه شده و ذرات به‌طور یکنواخت در زمینه توزیع شده‌اند [13].

هدف از انجام این پژوهش تولید کامپوزیت زمینه آلومینیم A356 با استفاده از ذرات تقویت‌کننده میکرومتری و نانومتری کاربید سیلیسیم با روش ریخته‌گری گردابی و مقایسه سختی و استحکام فشاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با ذرات نانومتری و میکرومتری است. همچنین در این تحقیق به تأثیر عملیات حرارتی T6 روی ریزساختار، سختی و استحکام فشاری آلیاژ پایه و کامپوزیت‌های تولید شده پرداخته شده است.

2- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش برای تولید کامپوزیت زمینه فلزی، آلیاژ آلومینیم A356 انتخاب شده که ترکیب شیمیایی آن در جدول 1 ارائه شده است.

دلایل استفاده از این آلیاژ به‌عنوان زمینه کامپوزیت عبارت است از:

1- برای کامپوزیت‌های Al/SiC_p که به روش حالت مایع تولید می‌شوند، برای جلوگیری از واکنش فصل مشترک تحت زمان طولانی و درجه حرارت بالا، آلیاژ زمینه باید شامل حداقل 7 درصد سیلیسیم باشد [14].
2- قابلیت ریختگی خوب (سیالیت بالای مذاب در هنگام ریخته‌گری)
3- قابلیت عملیات حرارتی این آلیاژ

از دو نوع پودر کاربید سیلیسیم با متوسط اندازه ذره 50 نانومتر و 5 میکرومتر به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده شده است. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و الکترونی عبوری از پودرهای تقویت‌کننده میکرومتری و نانومتری کاربید سیلیسیم در شکل‌های 1 و 2 نشان داده شده است.

برای تولید کامپوزیت زمینه آلومینیمی مقدار 500 گرم از آلیاژ A356 در بوته گرافیتی گذاشته شده و در داخل کوره ذوب مقاومتی قرار داده شد. ذوب کردن آلیاژ در دمای 800 درجه سلسیوس انجام شده و موقعی که آلیاژ خمیری شد، سطح آن با فلاکس کاورال 11 پوشش داده شد. برای افزایش ترشوندگی ذرات کاربید سیلیسیم با مذاب از یک درصد وزنی منیزیم استفاده

جدول 1 ترکیب شیمیایی فلز پایه

Table 1 Chemical composition of A356 alloy

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
7.10	0.18	0.14	0.10	0.42	0.10	0.18	bal

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.51.2]

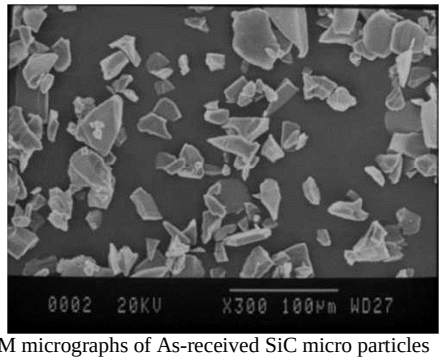

Fig. 1 SEM micrographs of As-received SiC micro particles

شکل 1 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات میکرومتری کاربید سیلیسیم

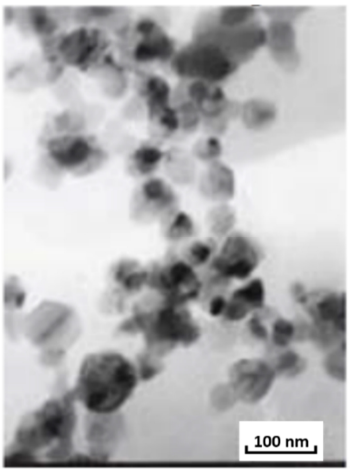

Fig. 2 TEM micrographs of As-received SiC nano particles

شکل 2 تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانوذرات کاربید سیلیسیم

شد. بعد از ذوب کامل آلیاژ، مذاب با قرص دگازر هگزاکلرواتان (C_2Cl_6) گازدایی شد. بعد از گازدایی، سطح مذاب کاملا سرباره گیری شده و برای جلوگیری از اکسید شدن، تحت گاز نیتروژن قرار گرفت. پودر کاربید سیلیسیم به‌کمک کوره الکتریکی و در اتمسفر هوا تحت عملیات حرارتی قرار داده شد. برای نانوذرات، دما و مدت‌زمان پیش‌گرم کردن به ترتیب 800 درجه سلسیوس و یک ساعت و برای ذرات میکرومتری نیز دما 1000 درجه سلسیوس و مدت‌زمان دو ساعت در نظر گرفته شد. پودر پیش‌گرم شده که درون فویل‌های آلومینیمی قرار داده شده بود، به‌تدریج به مذاب اضافه شد و مذاب با سرعت 600 دور بر دقیقه و به مدت 7 دقیقه توسط همزن فولادی زنگ نزن هم‌زده شد. پس‌ازآن مذاب درون قالب‌های استوانه‌ای شکل از جنس فولاد با قطر داخلی 20 میلی‌متر و ارتفاع 15 سانتی‌متر که در دمای 350 درجه سلسیوس پیش گرم شده‌اند، ریخته شد. از نانوذرات کاربید سیلیسیم به میزان 0.5 و 1.5 درصد وزنی و از ذرات میکرومتری به میزان 5 درصد وزنی به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده شد. شکل 3 همزن فولادی زنگ نزن و شکل 4 دستگاه ریخته‌گری گردابی استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

به‌منظور بررسی ریزساختار آلیاژ پایه و نمونه‌های کامپوزیتی، سطح نمونه‌ها تا کاغذ سنباده شماره 2000 پرداخت و روی پارچه نمدی پولیش‌کاری شد. به‌منظور آشکارسازی و حکاکی کردن سطح نمونه‌ها از محلول کلر (2 mL HF, 3 mL HCL, 5 mL HNO_3 and 190 mL H_2O) استفاده شد. ریزساختار آلیاژ ریختگی A356 و نمونه‌های کامپوزیتی در حالت ریختگی و عملیات حرارتی شده توسط میکروسکوپ‌های نوری (مدل

Fig. 3 View of stainless steel stirrer

شکل 3 نمایی از همزن فولادی زنگ‌نزن

Fig. 4 The stir casting system used in this study

شکل 4 سیستم ریخته‌گری‌گردابی استفاده شده در این پژوهش

آنیون[1]، الکترونی روبشی (مدل تسکن[2] و ژئول[3]) و الکترونی گسیل میدانی (مدل تسکن) بررسی شد.

برای بررسی سختی نمونه‌های تولیدشده، آزمون سختی‌سنجی برینل با قطر ساچمه 5 میلی‌متر و بار 980 نیوتون استفاده شد. برای هر نمونه 5 نقطه سختی‌سنجی انجام شد و میانگین مقادیر بدست آمده به‌عنوان سختی متوسط گزارش شد.

برای تعیین استحکام فشاری، از نمونه‌هایی با قطر 10 میلی‌متر و ارتفاع 15 میلی‌متر استفاده شد. برای انجام این آزمایش از دستگاه پرس سنتام[4] استفاده شد و بار اعمالی استفاده شده تا 100 کیلونیوتون بوده است. سرعت نیرو نیز در این آزمایش برابر با 1 میلی‌متر بر دقیقه بوده و آزمون فشار در دمای محیط انجام گرفت.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی ریزساختار

شکل 5 تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار آلیاژ پایه ریختگی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ریزساختار شامل دندریت‌های غنی از آلومینیم (مناطق سفید رنگ) و فاز یوتکتیک آلومینیم- سیلیسیم (مناطق تیره) است.

شکل 6 نیز تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار آلیاژ پایه را نشان می‌دهد. در این تصویر مناطق تیره رنگ، دندریت‌های غنی از

[1] Union
[2] Tescan
[3] Jeol
[4] Santam

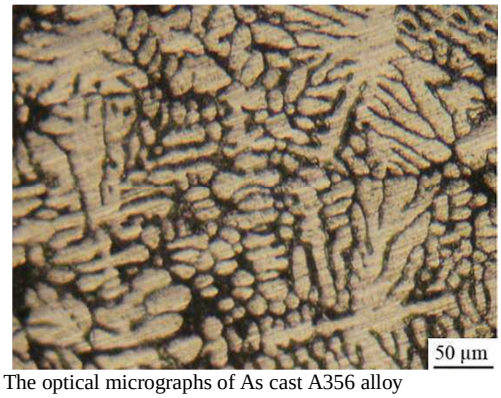

Fig. 5 The optical micrographs of As cast A356 alloy

شکل 5 تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار آلیاژ پایه

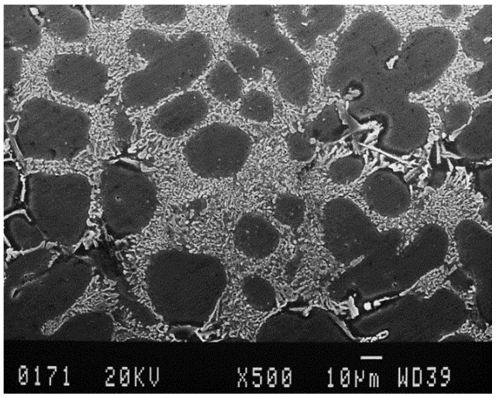

Fig. 6 The SEM images of microstructures A356 alloy

شکل 6 تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار آلیاژ پایه

آلومینیم و مناطق سفید رنگ نشان‌دهنده فاز یوتکتیک آلومینیم- سیلیسیم می‌باشد.

شکل 7 ریزساختار آلیاژ پایه و کامپوزیت تقویت‌شده با 5 درصد وزنی ذرات میکرومتری را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ریزساختار آلیاژ پایه تقویت‌نشده شامل دندریت‌های کشیده و بلند فاز α است. با اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده، طول دندریت‌ها کاهش یافته و ساختار به‌صورت دندریت‌های هم‌محور و ریزتری تبدیل شده است. این نشان می‌دهد که برخی از ذرات مانند کاربید سیلیسیم به‌عنوان محل‌هایی برای جوانه‌زنی غیر همگن در حین انجماد کامپوزیت‌هایی که به روش مایع تولید شده‌اند، عمل می‌کند. همچنین در کامپوزیت‌های تولید شده به‌روش مایع، اندازه دانه زمینه می‌تواند به‌مراتب ریزتر از آلیاژ تقویت‌نشده باشد که علت این امر قفل شدن مرز دانه‌ها توسط ذرات بوده که مانع از رشد دانه‌ها شده و باعث ریز شدن اندازه دانه‌های زمینه می‌شود [15,14].

در گزارش‌های قبلی نیز ریز شدن دندریت‌ها ناشی از اضافه نمودن ذرات تقویت‌کننده به زمینه آلومینیم A356 گزارش شده است [16,12].

آلیاژ A356 در حالت ریختگی شامل شبکه پیوسته‌ای از فاز سیلیسیم است (شکل 6) که بعد از عملیات حرارتی، ذرات سیلیسیم شکسته شده و به‌صورت تقریبا ریز و جداشده درآمده است که در شکل 8 مشاهده می‌شود.

حضور سیلیسیم اصلاح‌شده در زمینه آلومینیم (شکل 8) تأثیر عملیات حرارتی را روی اصلاح سیلیسیم صفحه‌ای و سوزنی شکل به ذرات سیلیسیم کروی نشان می‌دهد. فرایند ریز و کروی شدن ذرات سیلیسیم به‌وسیله عملیات حرارتی در دو مرحله رخ می‌دهد. مرحله اول شامل تکه‌تکه شدن (گلویی شدن) شاخه‌های سوزنی سیلیسیم و در مرحله دوم، شاخه‌های

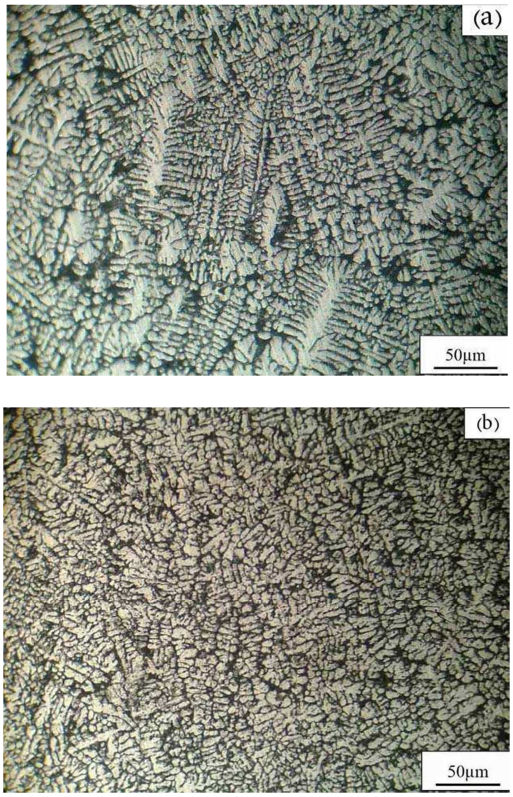

Fig. 7 The optical micrographs of (a) As-cast A356 alloy and (b) 5wt.% SiC microparticle reinforced composites

شکل 7 تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار (a) آلیاژ پایه (b) کامپوزیت تقویت‌شده با 5 درصد وزنی ذرات میکرومتری کاربید سیلیسیم

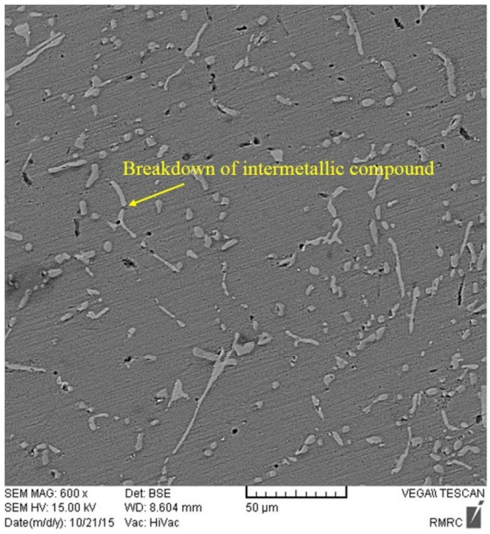

Fig. 8 The SEM images of microstructures A356 alloy in T6 heat treated condition

شکل 8 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار آلیاژ پایه عملیات حرارتی شده

جداشده در طول عملیات حرارتی کروی می‌شوند [17]. در شکل 8 علاوه بر کروی شدن فاز یوتکتیک سیلیسیم، ترکیب بین‌فلزی غنی از آهن با ریخت‌شناسی تیغه‌ای شکل که با کنتراست روشن‌تری نسبت به ذرات سیلیسیم مشاهده می‌شود، حین عملیات حرارتی T6 نیز شکسته شده است. مکانیزم کاهش طول تیغه‌های غنی از آهن، انحلال و خرد شدن این ترکیبات به درون زمینه است. در این پدیده، عناصری مانند آهن و سیلیسیم پس از

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.51.2]

کسب انرژی لازم از داخل فاز سوزنی شکل غنی از آهن به درون زمینه نفوذ کرده و باعث انحلال و خرد شدن این ترکیبات و کوتاه‌تر شدن طول این تیغه‌ها می‌شوند [18].

شکل 9 ریزساختار کامپوزیت تقویت‌شده با 5 درصد وزنی ذرات میکرومتری بعد از عملیات حرارتی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ذرات سیلیسیم به‌صورت تقریبا کروی در زمینه آلومینیم حضور دارند. ریخت‌شناسی بشقابی‌مانند سیلیسیم یوتکتیک که در حالت ریختگی ایجاد می‌شود، باعث کاهش خواص مکانیکی می‌شود. زیرا صفحات سیلیسیم، سخت و شکننده بوده و می‌توانند منجر به ترک در زمینه نرم فلزی شود. به همین دلیل لازم است که ریخت‌شناسی آن‌ها تغییر کند.

این عمل نشان می‌دهد که عملیات حرارتی T6 یکی از روش‌های مؤثر در کنترل ریزساختار و به دنبال آن بهبود خواص مکانیکی آلیاژ A356 است. در هنگام پیرسازی، رسوب Mg_2Si در محلول جامد فوق اشباع Al(α) در آلیاژ Al-Si-Mg رخ می‌دهد. گزارش شده است که رسوب Mg_2Si تقریبا دارای طول 0.5 میکرومتر و عرض کمتر از 50 نانومتر است [19]. به علت اندازه کم گزارش شده، این رسوب توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی تشخیص داده نشد. همچنین از نقاط سفیدرنگ موجود در زمینه کامپوزیت (ناحیه A) نیز آنالیز عنصری گرفته شد و نشان داده شد که این ذرات کاربید سیلیسیم می‌باشند.

برای جلوگیری از ورود گاز محیط به داخل مذاب در کلیه مراحل آزمایش، محیط کوره به‌وسیله گاز خنثی (نیتروژن) پوشش داده شد. ولی بااین‌حال نمی‌توان از ورود گازها به داخل مذاب به‌طور کامل جلوگیری کرد. به همین دلیل در ریخته‌گری گردابی نمی‌توان به‌طور کامل از تخلخل اجتناب کرد. زیرا ذرات تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های ذره‌ای، محل‌های مناسبی برای جوانه‌زنی حفرات گازی بوده و گاز جذب‌شده روی سطح ذرات به درون مذاب وارد می‌شود. همچنین با افزایش درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده، سیالیت مذاب کمتر شده و گرانروی افزایش می‌یابد و نرخ خروج گازهای محبوس شده از داخل مذاب در حین سرد شدن درحال انجماد کاهش می‌یابد [20,8]. از دیگر عوامل تشکیل حفره در این کامپوزیت‌ها می‌توان به جذب گاز هنگام هم زدن مذاب، محاصره شدن هوا دور ذرات تقویت‌کننده، و انقباض حین انجماد اشاره نمود [5].

در شکل 10 تصویر میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی از ریزساختار نانوکامپوزیت تقویت‌شده با 1.5 درصد وزنی ذرات کاربید سیلیسیم در حالت عملیات حرارتی نشان داده شده است که در آن نانوذرات به‌طور یکنواختی در زمینه توزیع شده است. توزیع مناسب ذرات تقویت‌کننده و افزایش تعدادآن‌ها در زمینه نشان‌دهنده تأثیر مثبت عملیات حرارتی ذرات و اضافه نمودن یک درصد وزنی منیزیم به آلیاژ بوده که باعث افزایش تر شوندگی ذرات و توزیع مناسب آن‌ها در زمینه شده است.

شکل 11 تصویر FESEM از ریزساختار کامپوزیت تقویت‌شده با 1.5 درصد وزنی در بزرگنمایی بالا در حالت عملیات حرارتی T6 به همراه آنالیز نقطه‌ای از نقاط مختلف به‌روش طیف‌سنج تفکیک انرژی را نشان می‌دهد.

این آنالیز بیانگر وجود نانوذرات کاربید سیلیسیم (ناحیه A) و رسوب Mg_2Si (نواحی B) که پس از 6 ساعت عملیات محلول‌سازی در دمای 540 درجه سلسیوس و 4 ساعت پیرسازی مصنوعی در دمای 190 درجه سلسیوس تشکیل شده می‌باشد.

3-2- سختی

نتایج بدست آمده در ارتباط با سختی نمونه‌ها در شکل 12 آورده شده است. مشاهده می‌شود که سختی تمام نمونه‌های کامپوزیتی از آلیاژ آلومینیم تقویت‌نشده بالاتر است. به دلیل اینکه کاربید سیلیسیم دارای سختی بالایی بوده و به‌عنوان مانعی در مقابل حرکت نابجایی‌ها عمل می‌کند، بنابراین سختی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با ذرات کاربید سیلیسیم بیشتر از آلیاژ پایه بوده و با افزایش درصد وزنی ذرات، میزان سختی نیز افزایش یافته است.

در حالت ریختگی اضافه شدن 1.5 درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم به زمینه آلومینیم باعث افزایش 31 درصدی سختی شده و بهبود

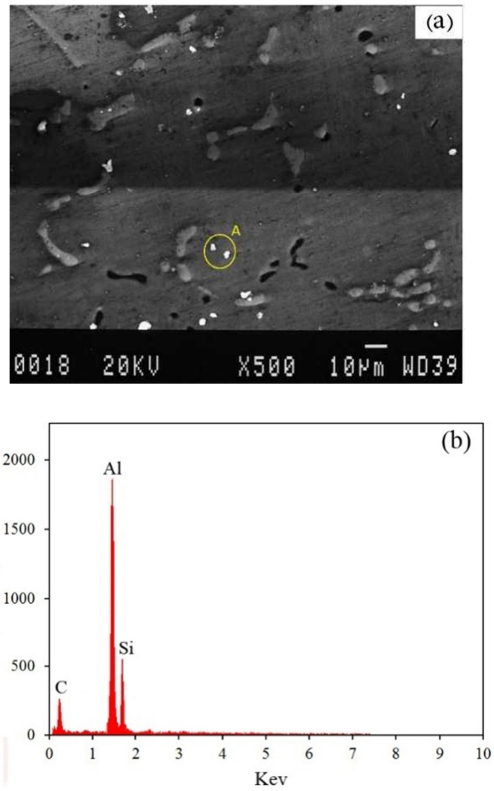

Fig. 9 (a) SEM micrograph of the 5wt.% SiC microparticle reinforced composites (b) EDS composition analysis

شکل 9 (a) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار کامپوزیت تقویت‌شده با 5 درصد وزنی ذرات میکرومتری (b) نتیجه آنالیز عنصری

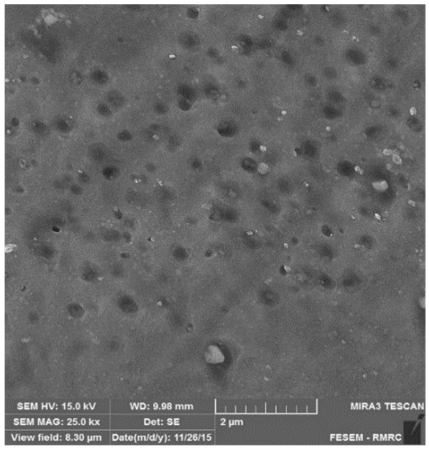

Fig. 10 FESEM micrograph of the 1.5wt. % SiC nanoparticle reinforced composites

شکل 10 تصویر میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی از ریزساختار کامپوزیت تقویت‌شده با 1.5 درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم

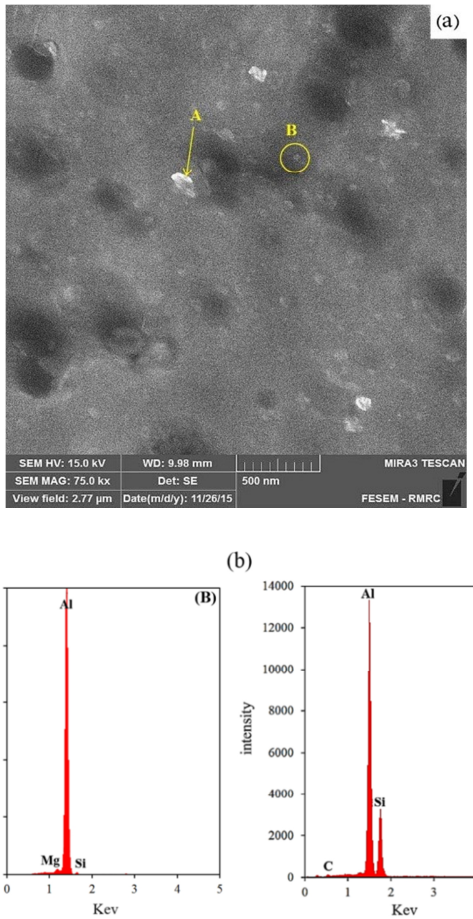

Fig. 11 (a) SEM micrograph of the 1.5wt. % SiC nanoparticle reinforced composites in high magnification (b) EDS composition analysis

شکل 11 (a) ریزساختار کامپوزیت تقویت‌شده با 1.5 درصد وزنی نانوذرات در بزرگنمایی بالا (b) نتایج آنالیز عنصری

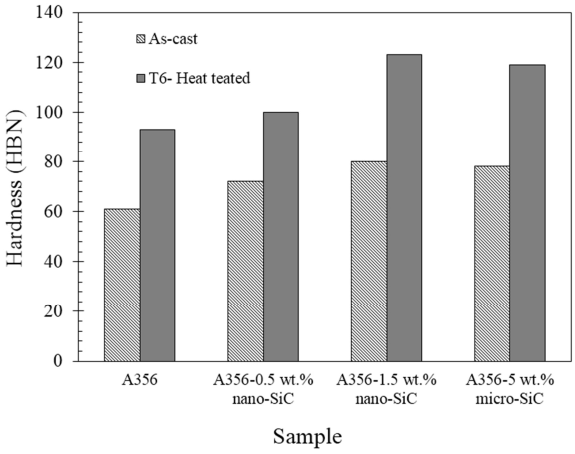

Fig. 12 The hardness variation of the composites with SiC content

شکل 12 تغییرات سختی کامپوزیت‌ها با مقدار کاربید سیلیسیم

سختی در کامپوزیت تقویت‌شده با 5 درصد وزنی ذرات میکرومتری به میزان 27 درصد می‌باشد. افزایش سختی ناشی از افزودن نانوذرات کاربید سیلیسیم نسبت به ذرات میکرومتری در زمینه آلومینیم، نشان‌دهنده این است که ذرات نانومتری نسبت به ذرات میکرومتری دارای تأثیر بیشتری در مکانیزم استحکام‌دهی (مکانیزم اوروان) دارند. این نتیجه با نتایج حاصل از پژوهش حاصل از رانا و همکاران مطابقت دارد [21].

در آلیاژهای Al-Si-Mg حضور سیلیسیم و منیزیم باهم می‌تواند باعث رسوب Mg_2Si شده و منجر به افزایش سختی آلیاژ عملیات حرارتی شده شود [22] که در شکل 11 (a) این رسوب مشاهده شده است که عامل اصلی افزایش سختی نمونه‌های کامپوزیتی عملیات حرارتی شده نسبت به حالت ریختگی است. انجام عملیات حرارتی به دلیل انحلال فازهای ثانویه و نفوذ بیشتر عناصر آلیاژی و تشکیل محلول جامد فوق اشباع، منجر به ایجاد ذرات مستحکم و ریز Mg_2Si با توزیع همگن پس از عملیات پیرسازی شده و باعث افزایش سختی نمونه‌ها شده است [18].

3-3- استحکام فشاری

در شکل 13 منحنی تنش- کرنش نمونه‌ها حاصل از آزمون فشار نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت عملیات حرارتی می‌توان استحکام تسلیم آلیاژ پایه را بهبود داد. به‌طوری‌که استحکام تسلیم آلیاژ پایه عملیات حرارتی شده نسبت به حالت ریختگی به مقدار 53 درصد افزایش یافته است. افزودن ذرات تقویت‌کننده به زمینه آلیاژ A356 نیز باعث افزایش استحکام تسلیم شده است. به‌طوری‌که با افزودن 1.5 درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم استحکام تسلیم آلیاژ پایه در حالت عملیات حرارتی حدود 21 درصد بهبود یافته است.

با کامپوزیت‌سازی و عملیات حرارتی T6 روی آلیاژ A356 می‌توان استحکام تسلیم را به‌طور چشم‌گیری افزایش داد. به‌طوری‌که با اضافه شدن 1.5 درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم و عملیات حرارتی T6 استحکام تسلیم نسبت به آلیاژ پایه ریختگی به میزان 87 درصد افزایش یافته است. همچنین استحکام تسلیم کامپوزیت تقویت‌شده با 1.5 درصد وزنی نانوذرات نسبت به 5 درصد وزنی ذرات میکرومتری به میزان 4 درصد بیشتر شده است.

در شکل 14 نیز استحکام فشاری نمونه‌ها در کرنش 35 درصد آورده شده است.

نتایج نشان داد که استحکام فشاری آلیاژ پایه با انجام عملیات حرارتی T6 افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که استحکام فشاری آلیاژ پایه در حالت عملیات حرارتی نسبت به حالت ریختگی در کرنش یکسان به میزان 28 درصد بهبود یافته است. درواقع با انجام عملیات حرارتی T6 فاز Mg_2Si در ساختار رسوب

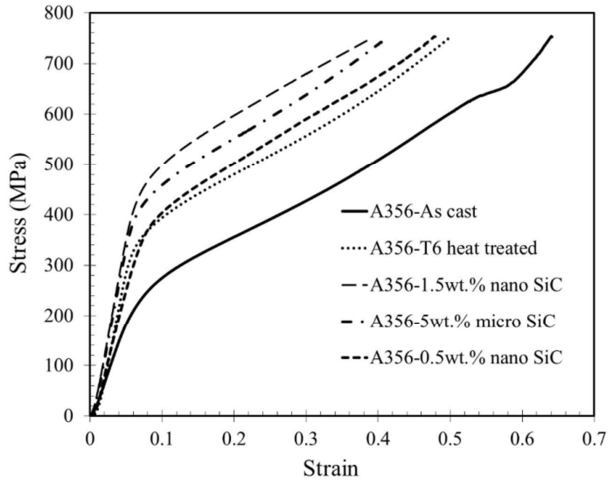

Fig. 13 The compressive stress–strain curves of samples

شکل 13 منحنی تنش- کرنش فشاری نمونه‌ها

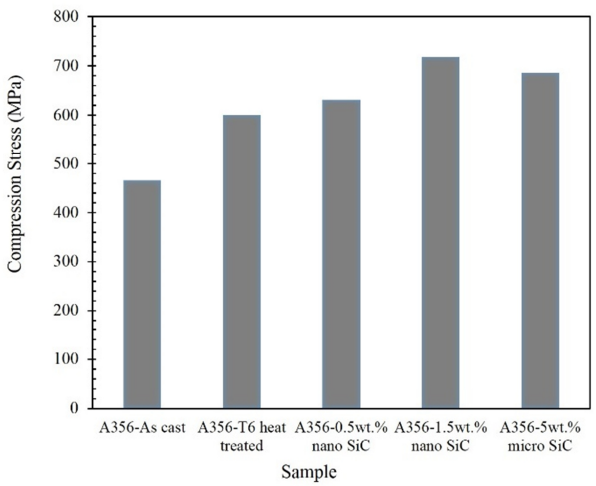

Fig. 14 Compression results at 35% strain

شکل 14 استحکام فشاری نمونه‌ها درکرنش 35 درصد

کرده که باعث افزایش خواص مکانیکی شده است.

عواملی مانند اصلاح دانه زمینه، توزیع مناسب ذرات تقویت‌کننده در زمینه، تنش‌های حرارتی چندجهته در فصل مشترک زمینه- ذره به علت اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین زمینه و ذرات تقویت‌کننده، انتقال بار از زمینه به ذرات تقویت‌کننده و مکانیزم استحکام دهی ذرات تقویت‌کننده از دلایل کلی افزایش استحکام فشاری نمونه‌های کامپوزیتی است [23].

مشاهده می‌شود که استحکام فشاری کامپوزیت تقویت‌شده با 1.5 درصد وزنی ذرات نانومتری نسبت به 5 درصد وزنی ذرات میکرومتری بالاتر شده است و این می‌تواند دو دلیل داشته باشد: اولا ذرات با اندازه بزرگ‌تر دارای فصل مشترک بیشتری با زمینه دارد و درنتیجه تمرکز تنش بیشتری را تحمل می‌کند. ثانیا ترک‌خوردگی در ذرات بزرگ‌تر بیشتر است و ذرات بزرگ‌تر بیشتر مستعد شکست هستند. بنابراین ذرات شکسته شده نمی‌توانند باری را تحمل کنند و به‌عنوان محل‌های ترجیحی برای شکست عمل می‌کنند [21]. همچنین ذرات نانومتری تأثیر بیشتری در مکانیزم استحکام‌دهی (مکانیزم اوروان و مکانیزم استحکام‌دهی ناشی از عدم انطباق انبساط حرارتی بین زمینه و ذرات کاربید سیلیسیم) نسبت به ذرات میکرومتری دارند [24]. بنابراین با توجه به دلایل ذکرشده مشاهده می‌شود که کامپوزیت تقویت‌شده با ذرات میکرومتری کاربید سیلیسیم دارای مقاومت فشاری کمتری نسبت به ذرات نانومتری است.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش کامپوزیت زمینه آلومینیم (A356) تقویت‌شده با ذرات نانومتری و میکرومتری کاربید سیلیسیم به روش ریخته‌گری گردابی با موفقیت تولید شده و نتایج زیر حاصل شد:

- اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده کاربید سیلیسیم باعث کاهش اندازه و ریز شدن دندریت‌ها در زمینه آلومینیم شده است.
- انجام عملیات حرارتی T6 روی آلیاژ A356 باعث تغییر در مورفولوژی سیلیسیم یوتکتیک به حالت ریز و تقریبا کروی شده می‌شود. همچنین باعث خرد شدن و ریز شدن ترکیب بین‌فلزی غنی از آهن در ساختار می‌شود. وجود منیزیم و سیلیسیم باهم نیز منجر به رسوب فاز Mg_2Si طی مرحله پیرسختی در آلیاژ A356 شده است.
- عملیات حرارتی T6 باعث افزایش خواص مکانیکی آلیاژ A356 شده است. به‌طوری‌که سختی و استحکام فشاری به ترتیب 53 درصد و 28 درصد نسبت به آلیاژ پایه در حالت ریختگی بهبود یافته است. رسوب فاز مستحکم Mg_2Si طی عملیات حرارتی پیرسختی در زمینه عامل اصلی در افزایش سختی و استحکام فشاری است.
- اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده کاربید سیلیسیم به زمینه آلومینیم A356 باعث افزایش خواص مکانیکی می‌شود. به‌طوری‌که با اضافه شدن 1.5 درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم و انجام عملیات حرارتی T6، سختی 62 برینل نسبت به آلیاژ پایه در حالت ریختگی افزایش یافته است. همچنین استحکام فشاری در کرنش 35 درصد به میزان 54 درصد بهبود یافته است.
- تأثیر اضافه کردن ذرات نانومتری به‌عنوان تقویت‌کننده در زمینه آلیاژ آلومینیم A356 در افزایش خواص مکانیکی، بیشتر از ذرات تقویت‌کننده میکرومتری شده است. به‌طوری‌که سختی و استحکام فشاری کامپوزیت تقویت‌شده با 1.5 درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم نسبت به 5 درصد وزنی ذرات میکرومتری به ترتیب، 3 درصد و 5 درصد بالاتر شده است.

5- مراجع

[1] A. B. Elshalakany, T. A. Osman, A. Khattab, B. Azzam, Microstructure and mechanical properties of MWCNTs reinforced A356 aluminum alloys cast nanocomposites fabricated by using a combination of rheocasting and squeeze casting techniques, *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2014, No. 1, pp. 1-14, 2014.

[2] I. S. Mahallawi, A. Y. Shash, A. Amer, Nanoreinforced cast Al-Si alloys with Al_2O_3, TiO_2 and ZrO_2nanoparticles, *Metals*, Vol. 5, No. 2, pp. 802-821, 2015.

[3] K. Amouri, Sh. Kazemi, M. Kazazi, Evaluationof the microstructure and mechanical properties of Al-SiC nanocomposite fabricated by stir casting, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 21-28, 2016 (in Persian فارسی)

[4] H. R. Ezatpour, S. A.Sajjadi, M. H. Sabzevar, Y. Huang, Investigation of microstructure and mechanical properties of Al6061-nanocomposite fabricated by stir casting, *Materials & Design*, Vol. 55 , No.1, pp. 921-928, 2014.

[5] S. Amirkhanlou, B. Niroumand, Synthesis and characterization of 356-SiCp composites by stir casting and compocasting methods, *Transactions of nonferrous metals society of china*, Vol. 20, No.3, pp. 788-793, 2010.

[6] S. Suresh, N. S. Moorthi, S. C. Vettivel, N. Selvakumar, Mechanical behavior and wear prediction of stir cast Al–TiB_2 composites using response surface methodology, *Materials & Design*, Vol. 59 , No. 1, pp. 383-396, 2014.

[7] R. G. Bhandare, P. M. Sonawane, Preparation of aluminium matrix composite by using stir casting method, *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, Vol. 3 , No. 3, pp. 61-65, 2013.

[8] P. Sharma, G. Chauhan, N. Sharma, Production of AMC by stir casting – an overview, *International Journal of Contemporary Practices*, Vol. 2, No. 1, pp. 23-46, 2011.

[9] S. M. Suresh, D. Mishra, A. Srinivasan, R. M. Arunachalam, R.Sasikumar, Production and characterization of micro and nano Al_2O_3 particle-reinforced LM25 aluminium alloy composites, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 6 , No. 6, pp. 94-97, 2011.

[10] M. Hajizamani, H. Baharvandi, Fabrication and studying the mechanicalproperties of A356 alloy reinforced with Al_2O_3-10% Vol. ZrO_2 nanoparticles through stir casting, *Advances in Materials Physics and Chemistry*, Vol. 1, No. 2, pp. 26-30, 2011.

[11] J. Hashim, L. Looney, M. S. J. Hashmi, The wettability of SiC particles by molten aluminium alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 119, No. 1-3, pp. 324-328, 2001.

[12] S. A. Sajjadi, H. R. Ezatpour, M. T. Parizi, Comparison of microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy/Al_2O_3 composites fabricated by stir and compo-casting processes, *Materials & Design*, Vol. 34, No.1, pp. 106-111, 2012.

[13] B. Ravi, B. B. Naik, J. U. Prakash, Characterization of aluminium matrix composites (AA6061/B_4C) fabricated by stir casting technique, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 2, No. 4-5, pp. 2984-2990, 2015.

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.51.2]

[14] A. Mazahery, M. O. Shabani, Plasticity and microstructure of A356 matrix nano composites, *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, Vol. 25, No. 1, pp. 41–48, 2013.

[15] K. K. Chawla, N. Chawla, *Metal Matrix Composites*, Second Edittion, pp. 174, New York: Springer, 2013.

[16] M. Karbalaei Akbari, H.R. Baharvandi, K. Shirvanimoghaddam, Tensile and fracture behavior of nano/micro TiB_2 particle reinforced casting A356 aluminum alloy composites, *Materials and Design*, Vol. 66 , No. 1, pp. 150-161, 2015.

[17] F. Paray, J. E. Gruzleski, Modification - a parameter to consider in the heat treatment of Al-Si alloys, *Cast Metals*, Vol. 5, No. 4, pp. 187-198, 1993.

[18] A. Eshaghi, J. Rasizadeh, H. Ghasemi, R. Taghiabadi, Effects of solution treatment on the microstructure and wear behavior of 332 aluminum alloy, *Journal of the college of engineering*, Vol. 43, No. 2, pp. 139-148, 2009. (in Persian فارسی)

[19] J. Peng, X. Tang, J. He, D. Xu, Effect of heat treatment on microstructure and tensile properties of A356 alloys, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, No. 9, pp. 1950-1956, 2011.

[20] J. Hashim, L. Looney, M. S. J. Hashmi, Metal matrix composites: Production by the stir casting method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 92-93, No. 1, pp. 1-7, 1999.

[21] R. S. Rana, R. Purohit, S. Das, Fabrication and testing of ultrasonically assisted stir cast AA 5083-SiC_p Composites, *Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 3, No. 5, pp. 386-393, 2013.

[22] H.R. Lashgari, Sh. Zangeneh, H. Shahmir, M. Saghafi, M. Emamy, Heat treatment effect on the microstructure, tensile properties and dry sliding wear behavior of A356–10%B_4C cast composites, *Materials and Design*, Vol. 31, No. 9, pp. 4414–4422, 2010.

[23] E. Damavandi, S. Nourouzi, S.M. Rabiee, Effect of porosity on microstructure and mechanical properties of Al_2O_3(p)/Al-A356 MMC, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 243-250, 2015 (in Persian فارسی)

[24] A. S. Zadeh, Comparison between current models for the strength of particulate-reinforced metal matrix nanocomposites with emphasis on consideration of Hall–Petch effect, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 531, No. 1, pp. 112-118, 2012.

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.51.2]