



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



## تأثیر افزودن اربیم بر مشخصه‌های ریزساختاری و رفتار فشاری کامپوزیت‌های درجای Al-15 wt.% Mg<sub>2</sub>Si

زهرا روستا<sup>1</sup>، حامد خسروی<sup>2\*</sup>، اسماعیل توحیدلو<sup>2</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

2- استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

\* زاهدان، 98155987، hkhosravi@eng.usb.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

اصلاح ذرات تقویت‌کننده Mg<sub>2</sub>Si در کامپوزیت‌های درجای Al-Mg<sub>2</sub>Si به عنوان عامل کلیدی برای بهبود خواص مکانیکی این کامپوزیت‌ها به شمار می‌رود. در تحقیق حاضر، اثر افزودن اربیم بر مشخصه‌های ریزساختاری و رفتار فشاری کامپوزیت درجای Al-15 wt.% Mg<sub>2</sub>Si مورد بررسی قرار گرفته است. ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزودن 0.6 درصد وزنی اربیم اندازه ذرات Mg<sub>2</sub>Si اولیه از 14 به 8.5 میکرومتر کاهش یافته و همچنین مورفولوژی آن‌ها از حالت دندریتی به حالت چندوجهی تبدیل شد. افزودن اربیم باعث تغییر مورفولوژی Mg<sub>2</sub>Si پوتکتیکی از حالت ورقه‌ای به حالت الیافی ریز شد. در کنار این موارد، مقداری ترکیب Al<sub>3</sub>Er در حین انجماد کامپوزیت در ناحیه پوتکتیکی تشکیل شد. نتایج آزمون فشار نشان داد که افزودن اربیم باعث بهبود استحکام فشاری کامپوزیت می‌شود به طوری که بیشترین میزان بهبود (32 درصد) در ارتباط با نمونه حاوی 0.6 درصد اربیم مشاهده شد.

دریافت: 97/01/28

پذیرش: 97/02/19

### کلیدواژگان:

کامپوزیت درجای Al-Mg<sub>2</sub>Si

اربیم

ریزساختار

استحکام فشاری

## Effect of Er addition on the microstructural characteristics and compressive behavior of insitu Al-15 wt.% Mg<sub>2</sub>Si composites

Zahra Rousta, Hamed Khosravi\*, Esmaeil Tohidlou

Department of Materials Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

\* P.O.B. 98155987, Zahedan, Iran, \* hkhosravi@eng.usb.ac.ir

### Keywords

Al-Mg<sub>2</sub>Si in situ composite  
Erbium  
Microstructure  
Compressive strength

### Abstract

The modification of Mg<sub>2</sub>Si is considered as a key parameter to improve the mechanical properties of Al-Mg<sub>2</sub>Si composites. In the present work, the effect of Erbium (Er) on the microstructural characteristics and compressive behavior of cast Al-15 wt.% Mg<sub>2</sub>Si in situ metal matrix composite was studied. Microstructural examination was conducted using optical and scanning electron microscopy (SEM). The results showed that the size of the primary Mg<sub>2</sub>Si phase was reduced from 14 to 8.5 μm with the addition of 0.6 wt.% Er and the its morphology was modified from a coarse dendritic shape to a polyhedral shape. Through the addition of Er, the morphology of eutectic Mg<sub>2</sub>Si was also altered from coarse flake-like to a fine fibrous form. Besides, it was found that some Al<sub>3</sub>Er compound were formed during solidification. Compression test indicated that Er addition enhanced the compressive strength of the composite. The highest compressive strength was obtained for the 0.6 wt.% of Er-modified composite with 32% increase.

Please cite this article using:

Rousta, Z., Khosravi, H., Tohidlou, E., "Effect of Er addition on the microstructural characteristics and compressive behavior of insitu Al-15 wt.% Mg<sub>2</sub>Si composites". In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 2, pp. 242-247, 2019.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

www.SID.ir

## 1- مقدمه

همکارانش [20] مشاهده کردند که با افزودن 2 درصد وزنی منگنز به کامپوزیت  $Al-15\%Mg_2Si$  مورفولوژی ذرات  $Mg_2Si$  اولیه مکعبی شکل شده که مقدار بهینه برای بهبود استحکام کششی و درصد ازدیاد طول نمونه می‌باشد.

مطابق جستجوهای انجام شده تاکنون تحقیق جامعی در ارتباط با افزودن عنصر نادر خاکی اربیم و همچنین تأثیر آن بر رفتار فشاری کامپوزیت درجای  $Al-15\%Mg_2Si$  صورت نگرفته است که همین موضوع علت انتخاب تحقیق حاضر بود.

## 2- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، ابتدا با استفاده از فلزات با درصد خلوص بالا آلومینیم، منیزیم و سیلیسیم با نسبت‌های وزنی مشخص (9.5 درصد وزنی منیزیم و 5.5 درصد وزنی سیلیسیم) و همچنین احتساب درصد اتلاف آن‌ها، کامپوزیت درجای  $Al-15\%Mg_2Si$  ریخته‌گری شد. روش کار بدین صورت بود که ابتدا آلومینیوم خالص را درون بوته گرافیتی قرار داده و با استفاده از یک کوره الکتریکی تا دمای  $800^\circ C$  حرارت داده شد تا به صورت کامل ذوب شود. در ادامه مقدار مشخص سیلیسیم درون مذاب آلومینیم ریخته و پس از حل شدن کامل آن مقدار محاسبه شده منیزیم به مذاب اضافه شد. ریخته‌گری مذاب حاصل در دمای  $750^\circ C$  صورت گرفت. پس از تولید شمش‌های کامپوزیتی اولیه، ذوب مجدد آن‌ها صورت گرفته و درصدهای وزنی مشخص اربیم (0، 0.2، 0.4، 0.6 و 1 درصد) به آن افزوده و پس از همزدن در دمای  $750^\circ C$  ذوب‌ریزی درون قالبی فلزی (شکل 1) انجام شد. اربیم در قالب آمیزان  $Er$  30wt.%  $Al$  به مذاب افزوده شد. لازم به ذکر است که پیش گرم کردن قالب قبل از ریخته‌گری تا دمای حدود  $200^\circ C$  صورت گرفت.

به منظور بررسی ریزساختاری نمونه‌ها عملیات برشکاری و متالوگرافی بر روی نمونه‌ها صورت گرفته و در ادامه داخل محلول آبی  $0.5\% HF$  حکاکی شدند. برای این منظور از میکروسکوپ نوری مدل اولمپوس<sup>2</sup> و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM<sup>3</sup>) مدل تسکن<sup>4</sup> مجهز به طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX<sup>5</sup>) استفاده شد. به منظور بررسی خواص فشاری نمونه‌ها از دستگاه یونیورسال اینسترون<sup>6</sup> با سرعت جابجایی فک  $1mm/min$  استفاده شد.



Fig. 1 The used mold in this study

شکل 1 قالب فلزی مورد استفاده در این تحقیق

داشتن همزمان خواص فیزیکی و مکانیکی بسیار مطلوب در کامپوزیت‌های زمینه فلزی باعث شده است که این دسته از مواد کاربردهای بسیاری را در صنایع مختلف از جمله هوافضا و خودروسازی داشته باشند. در این میان کامپوزیت‌های ذره‌ای<sup>1</sup> به دلیل دارا بودن خواص ایزوتروپی مورد توجه بیشتری واقع شده‌اند [3-1].

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت‌شده با ذرات به دلیل استحکام کششی ویژه و مدول بالای آن‌ها و همچنین مقاومت به سایش بالا و انبساط حرارتی پایین، به عنوان مواد مهندسی پیشرفته در صنایع مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند [4-6].

از میان روش‌های مختلف برای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی ذره‌ای، روش ساخت درجا دارای مزایایی همچون توزیع یکنواخت فاز تقویت کننده، ترشوندگی خوب ذرات با زمینه، پایداری فصل مشترک زمینه و تقویت کننده، کم بودن مراحل و هزینه تولید صنعتی می‌باشد [7,8]. آلیاژهای هایپرپوتکتیک  $Al-Si$  با مقادیر بالای  $Mg$  در حقیقت کامپوزیت‌های درجای زمینه آلومینیومی حاوی مقداری ذرات درشت و سخت  $Mg_2Si$  هستند [9,10]. کامپوزیت‌های  $Al-Mg_2Si$  پتانسیل بالایی برای استفاده در دیسک ترمز خودرو دارند، زیرا ترکیب بین فلزی  $Mg_2Si$  دارای دمای ذوب بالا، چگالی پایین، سختی زیاد، ضریب انبساط حرارتی کم و مدول الاستیک بالا می‌باشد [11]. با این حال، کامپوزیت‌های تولید شده به صورت درجا به دلیل اندازه بزرگ ذرات  $Mg_2Si$  و زمینه یوتکتیکی ترد، شکل پذیری کمی از خود نشان می‌دهند [12,13]. در واقع حضور فازهای  $Mg_2Si$  اولیه و یوتکتیکی درشت منجر به خواص مکانیکی ضعیف می‌شوند. بنابراین اصلاح اندازه و تغییر شکل ذرات  $Mg_2Si$  برای بهبود خواص مکانیکی بسیار ضروری به نظر می‌رسد [14-20]. اصلاح شیمیایی یکی از ساده‌ترین و موثرترین روش‌ها برای بهبود ریزساختار به شمار می‌رود که در این زمینه تاکنون تلاش‌های مختلفی صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

Bai و همکارانش [14] به بررسی اثر لانتانیم بر ریزساختار کامپوزیت درجای  $Al-Mg_2Si$  پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزودن 0.4 درصد لانتانیم سبب ریز و کروی شدن ذرات و به دنبال آن افزایش سختی، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول می‌شود. Xiaofeng و همکارانش [15] به این نتیجه دست یافتند که افزودن نئودیم به ترکیب کامپوزیت درجای  $Al-Mg_2Si$  سبب اصلاح  $Mg_2Si$  یوتکتیک و اولیه شد و به تبع آن خواص کششی کامپوزیت اصلاح شده بهبود یافت. Qin و همکارانش [16] مشاهده کردند که مورفولوژی ذرات  $Mg_2Si$  اولیه می‌تواند توسط استرانسیم اصلاح شود. Razavykia و همکارانش [17] نشان دادند که افزودن بیسموت به کامپوزیت درجای  $Al-20\% Mg_2Si$  باعث کاهش متوسط ذرات تقویت کننده می‌شود. VaziriYeganeh و همکارانش [18] در تحقیقاتشان نشان دادند که افزودن فسفر اندازه متوسط ذرات  $Mg_2Si$  اولیه را در شرایط ریخته‌گری از 220 به 22 میلی‌متر کاهش داد. همچنین در این تحقیق نشان داده شد که مقدار اکتروتود گرم شده، 1 درصد وزنی است. Akhlaghi و همکاران [19] به این نتیجه رسیدند که با افزودن 3 درصد وزنی لانتانیم به کامپوزیت درجای  $Al-15\%Mg_2Si$  اندازه متوسط ذرات اولیه  $Mg_2Si$  از 17 به 10 میکرون کاهش یافت و استحکام کششی از 217 به 223 مگاپاسکال افزایش یافت. Ghorbani

<sup>1</sup>Particulate reinforced composites

<sup>2</sup> OLYMPUS

<sup>3</sup> Scanning electron microscopy

<sup>4</sup> VEGA\TESCAN

<sup>5</sup> Energy-dispersive X-ray spectroscopy

<sup>6</sup> Instron



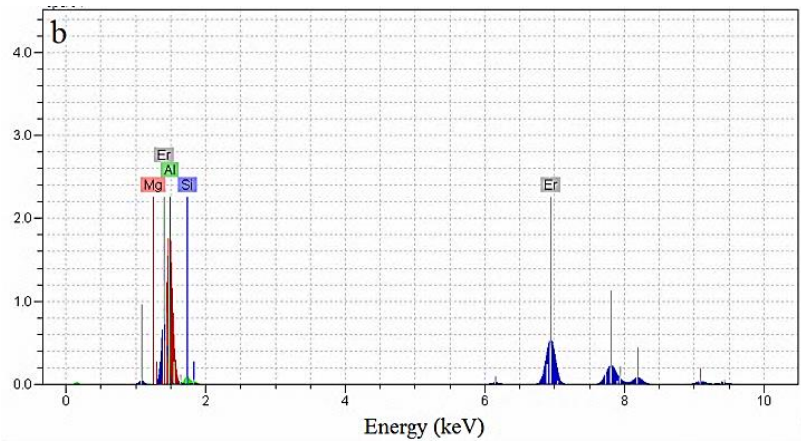
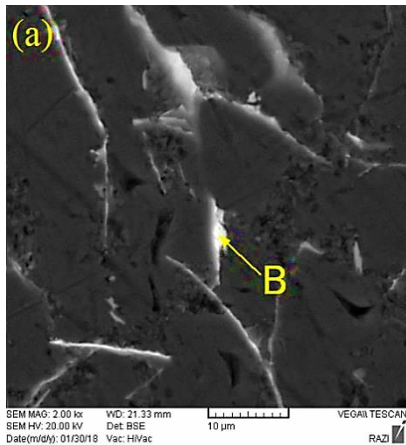


Fig. 6 a) SEM image and b) EDX analysis of the Al-15%Mg<sub>2</sub>Si-1%Er specimen

شکل 6 تصویر SEM و الگوی EDX مربوط به نمونه Al-15%Mg<sub>2</sub>Si-1%Er

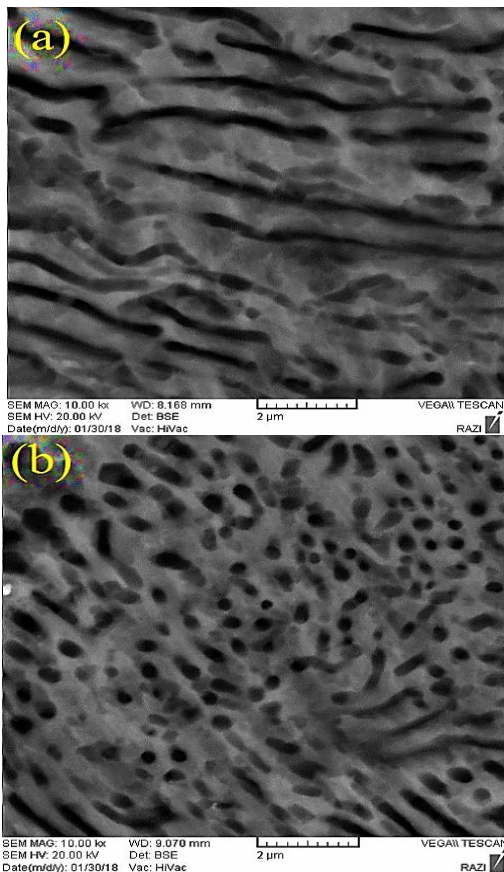


Fig. 8 High magnification image of eutectic Mg<sub>2</sub>Si a) unmodified and b) modified with 0.6 wt.% Er.

شکل 8 تصویر بزرگنمایی بالا از ذرات Mg<sub>2</sub>Si یوتکتیکی (a) اصلاح نشده و (b) اصلاح شده با 0.6 درصد اریبیم.

همانطور که در این تصاویر مشاهده می‌شود ذرات Mg<sub>2</sub>Si یوتکتیکی در کامپوزیت اولیه به صورت ورقه‌ای بوده و با افزودن اریبیم مورفولوژی آن تغییر و به صورت لیاف کوتاه یا نقطه مانند تبدیل می‌شود که علت این موضوع را می‌توان به تغییر انرژی فصل‌مشترک آلومینیم و Mg<sub>2</sub>Si در حضور اریبیم دانست.

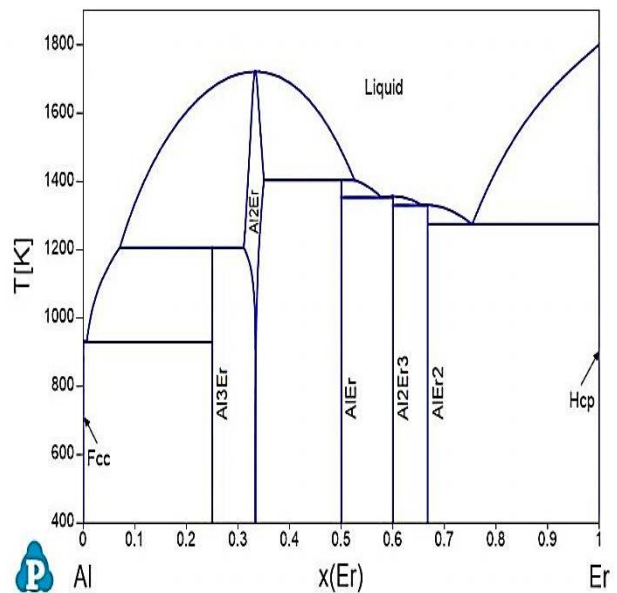


Fig. 7 Al-Er phase diagram [24]

شکل 7 دیاگرام فازی Al-Er [24]

به طور کلی، نقش عنصر اصلاح‌کننده اریبیم بر ریزساختار را می‌توان به صورت زیر بیان نمود. به خاطر حلالیت بسیار پایین اریبیم در زمینه آلومینیومی، اریبیم به آسانی در جلوی فصل‌مشترک در حال رشد Mg<sub>2</sub>Si تجمع کرده و باعث ایجاد یک سوپرکولینگ ترکیبی در مذاب می‌شود. میزان سوپرکولینگ ایجاد شده با درصد اریبیم افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، کاهش اندازه ذرات اولیه با ممانعت از رشد بلور در اثر قرارگرفتن اریبیم روی صفحات در حال رشد Mg<sub>2</sub>Si است. لازم به ذکر است که در درصدهای وزنی بالاتر اریبیم ذرات Al<sub>3</sub>Er درشت تشکیل می‌شوند [23] که از این طریق اثر مثبت اریبیم در ممانعت از رشد بلورها کاسته می‌شود.

در شکل 8 تصاویر بزرگنمایی بالا از ناحیه یوتکتیک کامپوزیت Al-15%Mg<sub>2</sub>Si اصلاح نشده (شکل 8a) و اصلاح شده با 0.6 درصد وزنی اریبیم (شکل 8b) نشان داده شده است.

- 2- حضور و تشکیل ذرات سفیدرنگ  $Al_3Er$  در زمینه یوتکتیکی کامپوزیت‌های درجا مورد تحقیق مشاهده شد.
- 3- افزودن اربیم باعث تغییر مورفولوژی ذرات  $Mg_2Si$  یوتکتیکی از حالت ورقه‌ای به حالت یبافی ریز یا نقطه مانند شد.
- 4- میزان استحکام فشاری در اثر افزودن اربیم بهبود یافت و بیشترین میزان بهبود استحکام فشاری در اثر افزودن 0.6 درصد وزنی اربیم (32 درصد بهبود) قابل مشاهده بود.

5- مراجع

[1] Shukla, M. Dhakad, S.K. Agarwal, P. and Pradhan, M.K., "Characteristic behaviour of aluminium matrix composites: A review", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, pp. 5830-5836, 2018.

[2] Tabesh, A. Ebrahimi, Gh. and Ezatpour, H.R., "The investigation and comparison of mechanical properties and microstructure Al/CNT and Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites produced by mixed accumulative roll bonding", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 4, pp. 464-470, 2018.

[3] Tayebi, M. Sharifi, H. and Ghayour, H., "Characterization of thermal cycles and investigation of thermal expansion behavior of the Al-4%Cu composite alloy reinforced by SiC particles", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 2, pp. 55-62, 2015.

[4] Amouri, Sh. Kazemi, M. and Kazazi, M., "Evaluation of the microstructure and mechanical properties of Al-SiC nanocomposite fabricated by stir casting", In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 21-28, 2016.

[5] Beygi, H. Shaterian, M. Tohidlou, E. and Rahimipour, M.R., "Development in wear resistance of Fe-0.7Cr-0.8Mn milling balls through in situ reinforcing with low weight percent TiC", *Advanced Materials Research*, Vol. 413, pp. 262-269, 2012.

[6] Khosravi, H. Bakhshi, H. and Salahinejad, E., "Effects of compositing process parameters on microstructural characteristics and tensile properties of A356-SiCp composites", *Transactions of Nonferrous Society of China*, Vol. 24, pp. 2482-2488, 2014.

[7] Mirarabshahi, F. and Mashreghi, A., "Fabrication and phases study in Al/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+AlxVy+AlaNiB) in situ composite", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 3, pp. 303-310, 2017.

[8] Jafari Nodoshan, H.R. Liu, W. Wu, G. Bahrami, A. Pech-Canul, M.I. and Emamy, M., "Mechanical and tribological characterization of Al-Mg<sub>2</sub>Si composites after yttrium addition and heat treatment", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, pp. 1146-1156, 2014.

[9] Samadi, A. and Ghayebloo, M., "Effect of Al-5Ti-B inoculant addition on the graded microstructure of centrifugally cast Al-13.8 wt.% Mg<sub>2</sub>Si composite", In Persian, *Journal of Advanced Materials in Engineering*, Vol. 34 (2), pp. 49-59, 2015.

[10] Ghandvar, H. Idris, M.H. Ahmad, N. and Emamy, M., "Effect of gadolinium addition on microstructural evolution and solidification characteristics of Al-15%Mg<sub>2</sub>Si in-situ composite", *Materials Characterization*, Vol. 135, pp. 57-70, 2018.

[11] Georgatis, E. Lekatou, A. Karantzalis, A.E. Petropoulos, H. Katsamakis S. and Poulia, A., "Development of a cast Al-Mg<sub>2</sub>Si-Si in situ composite: Microstructure, heat treatment, and mechanical properties", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 22, pp. 729-741, 2013.

[12] Bian, L. Liang, W. Xie, G. Zhang, W. and Xue J., "Enhanced ductility in an Al-Mg<sub>2</sub>Si in situ composite processed by ECAP using a modified BC route", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, pp. 3463-3467, 2011.

[13] Nasiri, N. Emamy, M. Malekan, A. and Norouzi, M.H., "Microstructure and tensile properties of cast Al-15%Mg<sub>2</sub>Si composite: Effects of phosphorous addition and heat treatment", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 556, pp. 446-453, 2012.

[14] Bai, G. Li, Z. Lin, J. Yu, Z. Hu, Y. and Wen, C., "Effects of the addition of lanthanum and ultrasonic stirring on the

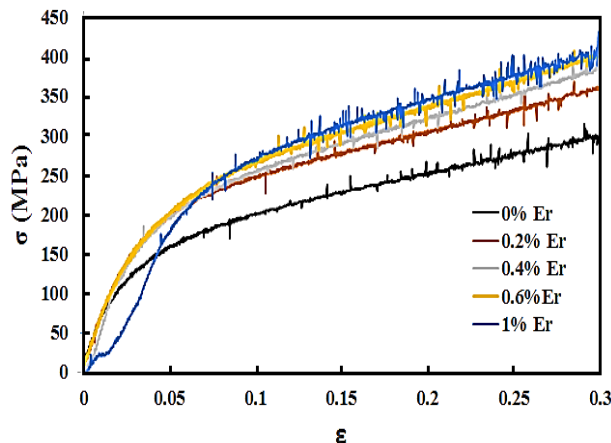


Fig. 9 Compressive stress-strain curves of modified Al-15%Mg<sub>2</sub>Si composite with various amounts of Er.

شکل 9 منحنی‌های تنش-کرنش فشاری نمونه‌های Al-15%Mg<sub>2</sub>Si اصلاح شده با درصد‌های مختلف اربیم.

Table 1 The values of compressive strengths extracted from Fig. 8

جدول 1 مقادیر استحکام فشاری استخراج شده از نمودارهای شکل 8

درصد وزنی اربیم	استحکام فشاری (MPa)
0	300
0.2	361
0.4	387
0.6	398
1	393

برای نشان دادن تأثیر تغییر ریزساختار ناشی از افزودن اربیم بر خواص مکانیکی کامپوزیت Al-15%Mg<sub>2</sub>Si آزمون فشار بر روی نمونه‌ها انجام شد که در شکل 9 منحنی‌های تنش-کرنش فشاری نشان داده شده‌اند. برای کلیه نمونه‌ها، آزمون تا کرنش 30 درصد بر روی نمونه‌ها صورت گرفت. همانطور که از داده‌های فشار مشخص است میزان استحکام فشاری در اثر افزودن اربیم بهبود یافته است و بیشترین میزان بهبود استحکام فشاری در اثر افزودن 0.6 درصد وزنی اربیم قابل مشاهده است. در این حالت میزان استحکام فشاری حدود 32 درصد بهبود یافته است. دلیل این بهبود را می‌توان به نقش موثر اربیم در اصلاح ریزساختار کامپوزیت شامل ریزشاندازه ذرات Mg<sub>2</sub>Si اولیه و همچنین تغییر مورفولوژی ذرات Mg<sub>2</sub>Si یوتکتیکی از حالت ورقه‌ای به یبافی ریز دانست. اما از سوی دیگر همانطور که در جدول 1 نشان داده شده است افزودن درصد‌های بالاتر اربیم (1 درصد) تأثیری بر استحکام فشاری نمونه در مقایسه با نمونه حاوی 0.6 درصد نداشته است که علت این امر را می‌توان به تشکیل ذرات درشت‌تر Al<sub>3</sub>Er در درصد‌های وزنی بالاتر اربیم نسبت داد.

4- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به بررسی اثر افزودن اربیم بر مشخصه‌های ریزساختاری و رفتار فشاری کامپوزیت درجای Al-15%Mg<sub>2</sub>Si پرداخته شده است. بدین منظور از درصد‌های وزنی مختلف اربیم (0، 0.2، 0.4، 0.6 و 1) استفاده شد و پس از انجام مطالعات ریزساختاری و آزمون فشار نتایج زیر حاصل شدند:

1- بیشترین میزان کاهش اندازه ذرات Mg<sub>2</sub>Si اولیه در نمونه حاوی 0.6 درصد وزنی اربیم قابل مشاهده بود، به طوری که با افزودن این مقدار اربیم، اندازه ذرات اولیه از 14 به 8.5 میکرومتر کاهش یافت.

- microstructure and mechanical properties of the in situ Mg<sub>2</sub>Si Al composites”, *Materials and Design*, Vol. 90, pp. 424-432, 2016.
- [15] Xiaofeng, W. Guang'an, Z. Fufa, W. and Zhe, W., “Influence of neodymium addition on microstructure, tensile properties and fracture behavior of cast Al-Mg<sub>2</sub>Si metal matrix composite”, *Journal of Rare Earths*, Vol. 31, pp. 307-313, 2013.
- [16] Qin, Q.D. Zhao, Y.G. Liu, C. Cong, P.J. and Zhou W., “Strontium modification and formation of cubic primary Mg<sub>2</sub>Si crystals in Mg<sub>2</sub>Si/Al composite”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 454, pp. 142-146, 2008.
- [17] Razavykia, A. Farahany, S. and Yusof, M.N., “Evaluation of cutting force and surface roughness in the dry turning of Al-Mg<sub>2</sub>Si in-situ metal matrix composite inoculated with bismuth using DOE approach”, *Measurement*, Vol. 76, pp. 170-182, 2015.
- [18] Vaziri Yeganeh, S.E. Razaghian, A. and Emamy M., “The influence of Cu-15P master alloy on the microstructure and tensile properties of Al-25 wt% Mg<sub>2</sub>Si composite before and after hot-extrusion”, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 566, pp. 1-7, 2013.
- [19] Akhlaghi, A. Noghani, M. and Emamy M., “The effect of La-intermetallic compounds on tensile properties of Al-15%Mg<sub>2</sub>Si in-situ composite”, *Procedia Materials Science*, Vol. 11, pp. 55-60, 2015.
- [20] Ghorbani, M.R. Emamy, M. Khorshidi, R. Rasizadehghani, J. and Emami, A.R., “Effect of Mn addition on the microstructure and tensile properties of Al-15%Mg<sub>2</sub>Si composite”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 550, pp. 191-198, 2012.
- [21] Zhang, J. Fan, Z. Wang, Y.Q. and Zhou, B.L., “Equilibrium pseudobinary Al-Mg<sub>2</sub>Si phase diagram”, *Materials Science and Technology*, Vol. 17, pp. 494-496, 2001.
- [22] Xudong, W. Shuangping, L. Junjun Y. Zhenlei, T. and Zuoren, N., “Microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Mn alloy with erbium”, *Rare Metals*, Vol. 31, pp. 237-244, 2012.
- [23] Shi, Z.M. Wang, Q. Zhao, G. and Zhang, R.Y., “Effects of erbium modification on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloys”, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 626, pp. 102-107, 2015.
- [24] <http://shuanglinchen.com/assets/PhaseDiagrams/Al/Al-Er.jpg>.