

# Investigating the Mechanical Behavior of Al A356-B4C / TiB<sub>2</sub> Composite Produced by Stir Casting\*

Research Article

Ali Alizadeh<sup>1</sup> Mehdi Abdollahi Azghan<sup>2</sup>

## 1- Introduction

The need for materials with high toughness and strength led to the production of metal composites (MMCs) reinforced with ceramic nanoparticles. Initially, due to the high cost and complexity of the production process, the use of these types of composites was limited to the military and aerospace sectors. But today, due to the invention of easier manufacturing methods, these types of composites have replaced various metal alloys in different equipment. The use of boron nitride-reinforced steel composites in tank armor, boron-fiber-reinforced aluminum composites in space shuttle hulls, aluminum-based composites in the brake discs of Lotus Elysee and 3M (which reduces the weight by 50% compared to cast iron), silicon carbide (SiC) based titanium composites used in the manufacture of Porsche car cylinders, and the use of copper-silver-based composites reinforced with diamond particles as electronic chips are part of the applications of MMC composites in industry.

TiB<sub>2</sub> is a very suitable choice as reinforcing phase in aluminum composites. The high hardness and melting temperature of TiB<sub>2</sub> are due to the strong bond between the titanium and boron atoms. The hardness of this material is about 2500 Vickers. Besides, B<sub>4</sub>C is formed by the covalent bonding of boron and carbon. B<sub>4</sub>C can be used as a ceramic matrix to build tank armor, bulletproof vests, ballistic missiles, and space shuttles.

Stir casting is one of the most common methods in the production of metal-based composites. The production costs in this method are about 30 to 50 percent lower than other production methods. One of the most important features of this method is the production of large and complex parts. But there is a need for a secondary process such as extrusion due to the uneven distribution of reinforcement [1, 13].

## 2- Experimental

In this study, Al A359 was used as the matrix material. The chemical composition is listed in Table 1. B<sub>4</sub>C powder with average particle size of 0.8 μm and 99% purity was used as the reinforcement.

The TiB<sub>2</sub> nanoparticles were processed in situ by using cryolite precursors (Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>), titanium oxide (TiO<sub>2</sub>), and potassium tetrafluoroborate (KBF<sub>4</sub>) (with 1:1:2 stoichiometry ratio between them) in aluminum melt. B<sub>4</sub>C microparticles were added directly into the melt. Argon gas was used to prevent the formation of aluminum oxide in all stages of the production process. After casting, all samples were subjected to T6 heat treatment. According to the standard of the current cycle, the sample was heated to 540 °C and kept at this temperature for 12 hours to complete the dissolution of silicon. The sample was then quenched in water at 80 °C and kept at 155 °C for 12 hours for the aging process. The sample codes and volume fraction of reinforcements are shown in Table 2.

**Table 1. Chemical composition of the aluminum alloy used as matrix**

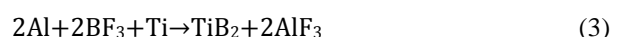
Element	Wt.%
Al	balance
Si	7.01
Mg	0.43
Mn	0.03
Fe	0.15
Cu	0.05
Ti	0.05
Zn	0.03
Pb	0.01>

**Table 2. Sample codes and volume fraction of reinforcements.**

Sample code	vol%	
	B <sub>4</sub> C	TiB <sub>2</sub>
1	0	0
2	2.5	0
3	5	0
4	7.5	0
5	2.5	2.5

## 3-Results and Discussion

The processes used to make the TiB<sub>2</sub> reinforcement are shown in stoichiometric relations of 1 to 6. Fig. 1 indicates the XRD analysis of sample No. 5. As can be seen, in addition to the TiB<sub>2</sub> phase, other phases such as Al<sub>3</sub>Ti, as an intermetallic compound, could be observed in the X-ray diffraction pattern.



\* Manuscript received: 2 January 2022; Revised, 24 April 2022, Accepted, 30 April 2022.

<sup>1</sup> Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Material Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran. **Email:** a\_alizadeh@mut.ac.ir

<sup>2</sup> Ph.D. Student, Department of Material Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

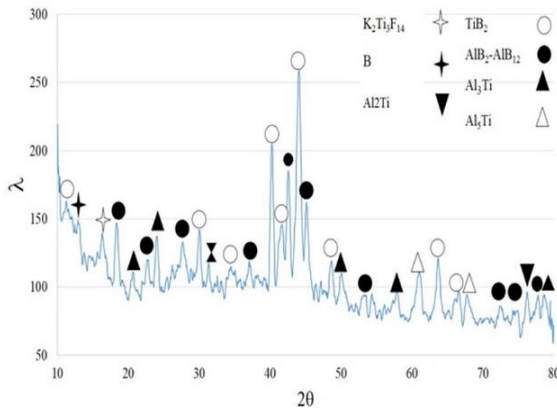
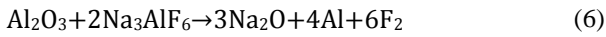
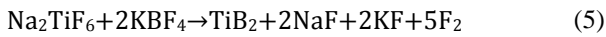
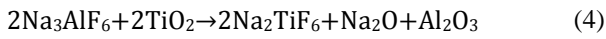


Figure 1. XRD pattern of sample no. 5.

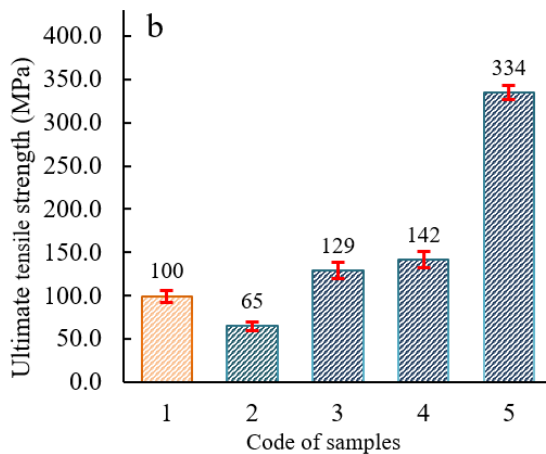
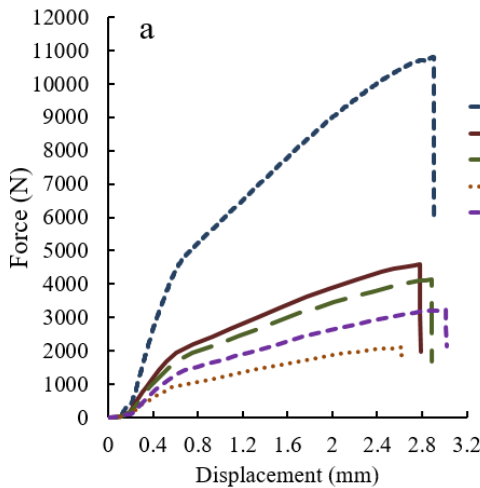


Figure 2. a) Force-displacement curve b) Ultimate tensile strength of various samples.

The force-displacement and tensile strength diagrams of TiB<sub>2</sub>- and B<sub>4</sub>C-reinforced A356 matrix composites are

shown in Fig 2. Addition of 2.5 vol. % B<sub>4</sub>C (sample No. 2) leads to a 35% reduction in strength values compared to the reinforcement-free sample (No. 1). However, the addition of 5 vol. % and 7.5 vol. % of B<sub>4</sub>C to samples No. 3 and 4 increases the tensile strength values up to 29% and 42% more than sample No. 1, respectively. Silicon blades are created in the aluminum matrix after the casting step. Fig. 3 show the SEM image and EDS analysis of sample No. 1 taken to validate the blade material. The EDS analysis taken from the desired area in Fig. 3a clearly shows a huge number of silicon particles.

B<sub>4</sub>C microparticles accumulated at the silicon blades-matrix interface and inhibited a uniform distribution of silicon particles after the T6 heat treatment, which resulted in a decline in tensile properties in comparison with the reinforcement-free sample.

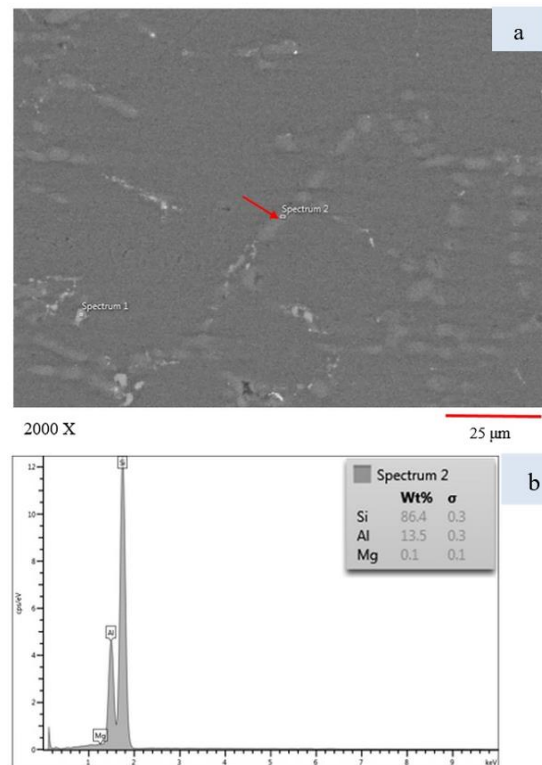


Fig. 3 a) SEM image and b) EDS spectrum of sample no. 1.

Fig. 4 indicates the optical microscopy image of the composites containing 5 vol. % and 7.5 vol. % B<sub>4</sub>C after the T6 heat treatment. By increasing the volume percentage of B<sub>4</sub>C in samples No. 3 and 4, reinforcement particles encircle and inhibit the development of Si blades. Because of this, the blades become more delicate and spherical. On the basis of the SEM image and EDS analysis of sample No. 4 shown in Fig. 5, the presence of Si particles is confirmed. Moreover, the intermetallic compound α-Al<sub>15</sub>(FeMn)<sub>3</sub>Si is detected at the matrix-Si blade interface (see Fig. 5c).

Sample No. 5, which had 2.5 vol. % B<sub>4</sub>C and 2.5 vol. % TiB<sub>2</sub>, had the highest tensile strength. It had a 235% increase over the reinforcement-free sample. The similar distribution of the reinforcements and the presence of TiB<sub>2</sub> nanoparticles in the matrix is the reason for the higher tensile strength of sample No. 5 than that of sample No. 1. Stress is transmitted to the reinforcement via the interface when force is applied. This results in increased strength values.

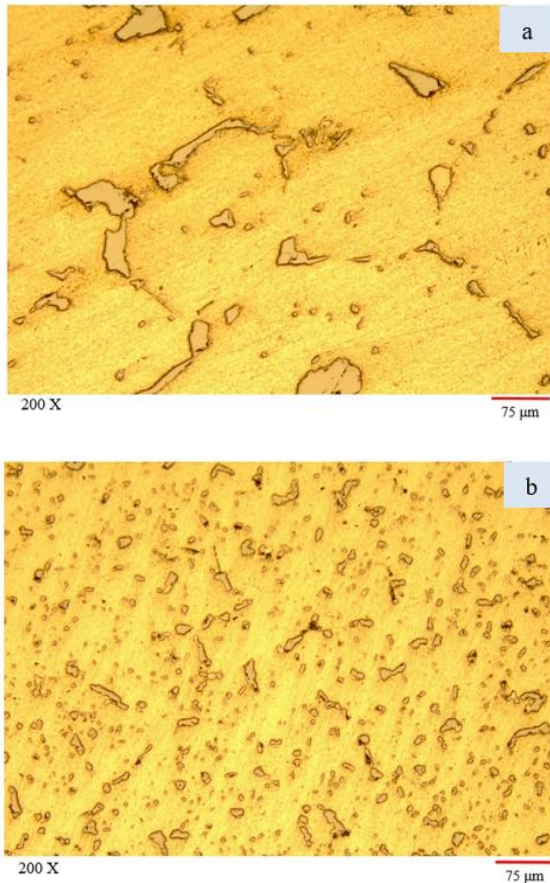


Figure. 4 OM images of samples No. a) 3 and b) 4.

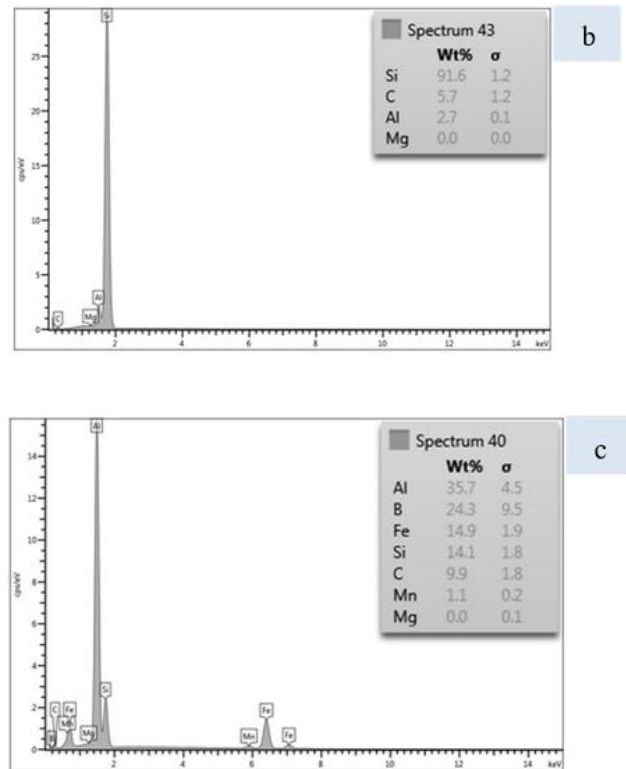
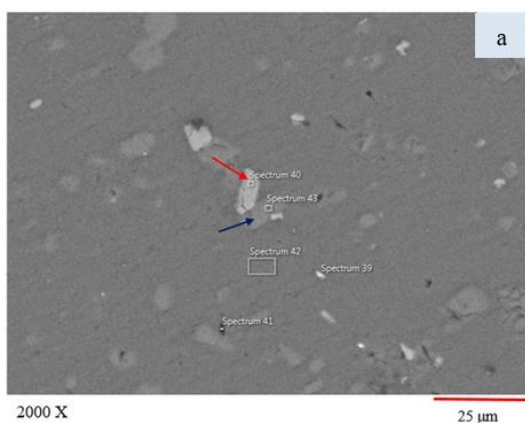


Figure. 5 a) SEM image and b) EDS spectra of sample no. 1. (Blue arrow) c) EDS spectrum of sample no. 1. (Red arrow).

#### 4- Conclusion

In this study, the effect of the addition of 2.5, 5, and 7.5 vol. % B<sub>4</sub>C microparticles and 2.5 vol. % TiB<sub>2</sub> nanoparticles on the microstructure and mechanical properties of the A356 aluminum matrix composite were investigated. The results were as follows:

The T6 heat treatment in the reinforcement-free sample broke the Si blades and improved the microstructure, but in the sample containing 2.5 vol.% B<sub>4</sub>C, the pile-up of microparticles at the Si blade-matrix interface prevented particles from crushing during the T6 heat treatment. After adding B<sub>4</sub>C reinforcement, the ultimate tensile strength and hardness were initially lowered and subsequently enhanced. In terms of tensile strength and hardness, the samples containing 2.5 vol. % B<sub>4</sub>C and 2.5 vol. % TiB<sub>2</sub> had the greatest and the lowest values, respectively.



## بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت $B_4C/TiB_2$ -Al A356 تولید شده به روش ریخته‌گری گردابی\*

مقاله پژوهشی

مهدی عبدالهی آذغان<sup>(۱)</sup>علی علیزاده<sup>(۱)</sup>

**چکیده** در تحقیق حاضر، تاثیر افزودن میکروذرات کاربید بور ( $B_4C$ ) و نانوذرات دی‌بورید تیتانیم ( $TiB_2$ ) بر ریزساختار، استحکام کششی و سختی کامپوزیت زمینه آلومینیوم A356 مورد مطالعه قرار گرفت. تقویت‌کننده  $B_4C$  با درصدهای حجمی ۲/۵، ۵ و ۷/۵ و تقویت‌کننده  $TiB_2$  با ۲/۵٪ حجمی به روش ریخته‌گری گردابی در دمای  $1000^\circ C$  تحت فرآیند درجا به زمینه اضافه شدند. نانوذرات  $TiB_2$  با روش درجا به وسیله پیش مواد کریولیت ( $Na_3AlF_6$ ) و اکسید تیتانیم ( $TiO_2$ ) و پتاسیم تترا فلورو بوراید ( $KBF_4$ ) در مذاب آلومینیوم فرآوری شد و میکروذرات  $B_4C$  بصورت مستقیم وارد مذاب شد. به منظور بررسی ریزساختار و فرایند شکست، از آنالیز پراش اشعه ایکس ( $XRD$ )، میکروسکوپ نوری ( $OM$ ) و میکروسکوپ الکترونی روبشی ( $SEM$ ) استفاده شد. همچنین از آزمون کشش و سختی به منظور بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت استفاده شد. نتایج نشان داد افزودن  $B_4C$  ابتدا باعث کاهش و سپس باعث افزایش استحکام کششی نهایی نسبت به نمونه بدون تقویت‌کننده شد. همچنین، بیشترین میزان استحکام کششی مربوط به نمونه حاوی ۲/۵٪ حجمی  $B_4C$  و ۲/۵٪ حجمی  $TiB_2$  است که نسبت به نمونه بدون تقویت‌کننده ۲۳۵ درصد بهبود نشان داد. اما استحکام کششی نمونه حاوی فقط ۲/۵٪ حجمی  $B_4C$  نسبت به نمونه بدون تقویت‌کننده ۳۵ درصد کاهش یافت. نتایج حاصل از آزمون سختی افت خواص در کامپوزیت حاوی ۲/۵٪ حجمی  $B_4C$  را نشان داد. بیشترین بهبود سختی نیز مانند استحکام کششی در نمونه حاوی ۲/۵٪ حجمی  $B_4C$  و ۲/۵٪ حجمی  $TiB_2$  بود که در مقایسه با نمونه بدون تقویت‌کننده ۳۳ درصد افزایش پیدا کرد.

**واژه های کلیدی** آلومینیوم A356، دی‌بورید تیتانیم، کاربید بور، ریخته‌گری گردابی

### مقدمه

آلومینیوم‌های آلیاژی خواص مکانیکی خوب از قبیل چقرمگی شکست بالا، استحکام خوب و قیمت پایین در مقایسه با سایر آلیاژهای فلزی از خود نشان می‌دهند که باعث استفاده بیشتر از آن‌ها نسبت به سایر آلیاژهای مورد استفاده در کامپوزیت-های MMC شده است [5]. آلومینیوم A356 به دلیل استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی مناسب، سیالیت و قابلیت ریخته‌گری عالی و همچنین ضریب انبساط حرارتی پایین از پرکاربردترین آلیاژهای ریخته‌گری آلومینیوم است. از جمله معایب این نوع آلیاژ انعطاف‌پذیری و چکش‌خواری پایین است که می‌توان با اصلاح روش ریخته‌گری این خواص را نیز بهبود بخشید [6].

افزودن تقویت‌کننده‌های پیوسته (الیاف بلند و صفحه‌ای) شامل گرافیت، بور و آلومینا ( $Al_2O_3$ ) و ناپیوسته (الیاف کوتاه و ذرات) شامل سیلسیم کاربید ( $SiC$ )، آلومینیوم اکسید ( $Al_2O_3$ )، دی‌بورید تیتانیم ( $TiB_2$ ) و کاربید بور ( $B_4C$ ) در زمینه فلزی افزایش چشم‌گیر خواص مکانیکی و حرارتی را به دنبال دارد [7].  $TiB_2$  یک گزینه بسیار مناسب برای مواد تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی است. سختی و دمای ذوب بالای

نیاز به مواد با چقرمگی و استحکام بالا سبب تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی ((MMC (Metal Matrix Composites) تقویت‌شده با نانوذرات سرامیکی شد. در ابتدا، استفاده از این نوع کامپوزیت-ها به دلیل هزینه بالا و سختی فرآیند تولید محدود به بخش نظامی و هوافضا می‌شد. اما امروزه به دلیل ابداع روش‌های ساخت آسان‌تر، در بسیاری از تجهیزات این نوع کامپوزیت‌ها جایگزین آلیاژهای فلزی مختلف شده است [1,2]. استفاده از کامپوزیت-های زمینه فولادی تقویت شده با بور نیتريد در زره تانک‌ها، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با الیاف بور در بدنه شاتل‌های فضایی، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی در دیسک‌های ترمز اتومبیل‌های لوتوس الیزه (Lotus Elise) و شرکت 3M آمریکایی (که باعث کاهش ۵۰ درصدی وزن دیسک‌ها در مقایسه با نوع چدنی شده است)، کامپوزیت زمینه تیتانیومی تقویت شده با الیاف سیلسیم کاربید ( $SiC$ ) در ساخت سیلندر اتومبیل‌های پورشه و استفاده از کامپوزیت زمینه مس-نقره تقویت شده با ذرات الماس به عنوان تراشه‌های الکترونیکی بخشی از کاربرد-های کامپوزیت‌های MMC در صنعت است [3,4].

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۱۰/۱۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۲/۱۰ می‌باشد.

ترمودینامیکی پیش‌بینی انجام واکنش به منظور بررسی بهتر بدون اتلاف مواد و زمان را برای دانشمندان محقق کرده است. مظاهری و همکاران [6] تاثیر افزودن  $B_4C$  به عنوان تقویت‌کننده با اندازه و درصد حجمی مختلف بر خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت با زمینه آلیاژی A356 را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند افزایش درصد حجمی و اندازه ذرات تقویت‌کننده افزایش تخلخل در کامپوزیت را به دنبال دارد. میزان کاهش وزن حاصل از آزمون سایش با افزایش درصد حجمی تقویت‌کننده افزایش یافته و همچنین افزایش اندازه ذرات بهبود چشم‌گیر مقاومت به سایش را نشان داد که آن‌ها افزایش سطح تماس بین زمینه و تقویت‌کننده و انتقال بهتر بار را عامل بهبود مقاومت به سایش دانستند.

هدایتیان و همکاران [14] تاثیر افزودن نانو صفحات اکسید گرافن بر خواص بالستیکی و جذب انرژی کامپوزیت زمینه آلومینیومی Al6061 تولید شده به روش ریخته‌گری گردابی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که با افزودن نانو صفحات اکسید گرافن، سرعت حد بالستیک نمونه‌های کامپوزیتی تا ۲۴ درصد نسبت به آلیاژ پایه بهبود یافته است.

وانگ و همکاران [15] تغییرات خواص مکانیکی حاصل از حضور  $TiB_2$  در زمینه آلومینیوم را بررسی کردند. در این پژوهش، آلیاژ آلومینیوم A356 در حالت‌های خام و عملیات حرارتی شده به عنوان زمینه و  $TiB_2$  در مقادیر مختلف که حاصل از انجام واکنش بین نمک‌های مذاب است به عنوان تقویت‌کننده مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها مشاهده کردند افزایش تقویت‌کننده تا ۹ درصد وزنی باعث افزایش خواص مکانیکی (استحکام خمشی، چقرمگی و سختی) و کاهش طول ازدیاد آن می‌شود.

در تحقیق حاضر، تاثیر ۲/۵٪ حجمی نانوذرات  $TiB_2$  و ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد حجمی  $B_4C$  بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت زمینه آلومینیوم A356 مورد مطالعه قرار گرفت. تاکنون تحقیقات کمی در رابطه با تاثیر ذرات تقویت‌کننده بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیومی انجام شده است. مزیت تحقیق حاضر نسبت به تحقیقات پیشین بررسی ترمودینامیکی انجام واکنش قبل ساخت نمونه و تعیین ریزساختار و خواص مکانیکی در حضور دو نوع نانوذره مختلف است. علاوه بر این شناسایی فرایندهای تاثیرگذار بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های

$TiB_2$  ناشی از پیوند قوی بین اتم‌های تیتانیوم و بور است. سختی این ماده حدود ۲۵۰۰ ویکرز است که در کاربردهای با مقاومت به سایش بالا به‌عنوان تقویت‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرند. استحکام بالای  $TiB_2$  باعث شده است در مواقع نیاز به استحکام بسیار بالا و وزن پایین، مواد مرکب آلومینیومی تقویت‌شده با  $TiB_2$  به‌عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها مطرح باشد. علاوه بر این، در دماهای بالا این ماده نسبت به اکسیداسیون مقاومت بالایی دارد. همچنین، مقاومت  $TiB_2$  به خوردگی و واکنش‌های شیمیایی نیز بسیار خوب است [8,9]. ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت‌شده با  $TiB_2$  ایجاد ترکیب بین فلزی  $Al_3Ti$  را به دنبال دارد که باعث کاهش شدید خواص مکانیکی کامپوزیت می‌شود. وانگ و همکاران [10] خواص مکانیکی کامپوزیت زمینه A356 تقویت شده با  $TiB_2$  را بررسی کردند. نتایج بدست آمده از XRD نشان داد اثری از ترکیب بین فلزی  $Al_3Ti$  دیده نمی‌شود. آن‌ها مشاهده کردند نمونه‌هایی که تحت عملیات ثانویه حرارتی قرار گرفتند استحکام و مدول کششی بالا و کرنش کمتری در مقایسه با نمونه‌های ریخته‌گری شده (بدون عملیات حرارتی) از خود نشان می‌دهند.

$B_4C$  از پیوند کووالانسی عناصر بور و کربن به وجود می‌آید که وجود این پیوند قوی میان دو عنصر باعث شده است کاربرد بور بعد از الماس و نیتريد بور مکعبی، سخت‌ترین ماده شناخته شده از  $B_4C$  می‌توان به عنوان تقویت‌کننده در زمینه فلزی و سرامیکی به‌منظور ساخت زره تانک‌ها، جلیقه‌های ضدگلوله، موشک‌های بالستیک، شاتل‌های فضایی، قطعات مقاوم در برابر ابزارهای برش و ساینده استفاده کرد [11,12]

روش ریخته‌گری گردابی یکی از روش‌های متداول در تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی است که هزینه‌های تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی در این روش حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد نسبت به سایر روش‌های تولید کمتر است. از مهم‌ترین ویژگی آن می‌توان به عدم محدودیت در تولید قطعات بزرگ و پیچیده اشاره کرد. اما به علت توزیع غیریکنواخت ذرات تقویت‌کننده در این روش نیاز به فرایند ثانویه مانند اکستروژن وجود دارد [1,13]. اگر ترمودینامیک، بیانگر عدم انجام واکنش در شرایط مشخص شده باشد، این پیش‌بینی حتمی است اما اگر ترمودینامیک انجام یک واکنش را پیش‌بینی کند، رخ دادن و سرعت آن بستگی به سینتیک واکنش دارد. امروزه نرم افزارهای

**مواد.** در تحقیق حاضر، آلیاژ آلومینیوم A356 به عنوان زمینه کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت. جدول (۱) عناصر تشکیل دهنده این آلیاژ را نشان می‌دهد. B<sub>4</sub>C به صورت پودر با متوسط اندازه ذرات حدود ۰/۸ μm و درصد خلوص ۹۹٪ مورد استفاده قرار گرفته است.

شکل (۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) می‌دهد. به منظور تولید ذرات TiB<sub>2</sub> از پیش مواد پتاسیم هگزا فلورو تیتانات (K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>) و پتاسیم تترا فلورو بورات (KBF<sub>4</sub>) (خریداری شده از Sigma-Aldrich، آمریکا) استفاده شد. همچنین از افزودنی اکسید سریم (CeO<sub>2</sub>) (خریداری شده از Sigma-Aldrich، آمریکا) استفاده شد. این افزودنی با کاهش انرژی سطحی بین آلومینیوم و نانوذرات TiB<sub>2</sub> چسبندگی بین زمینه و تقویت‌کننده را بهبود می‌بخشد. سدیم هگزا فلورو آلومینات (Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>) نیز به عنوان کمک ذوب و سرباره‌گیر مورد استفاده قرار گرفت.

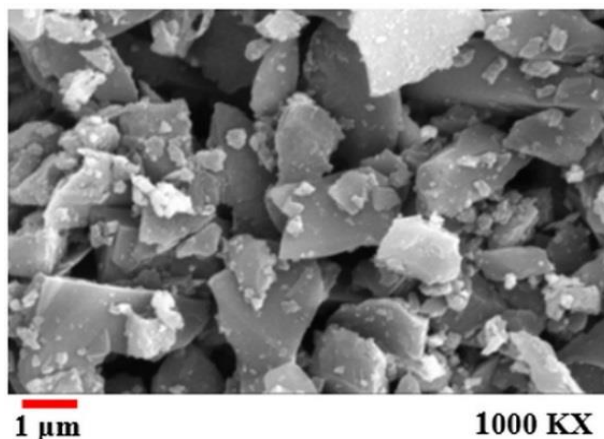
Al A356 تقویت شده با TiB<sub>2</sub> و B<sub>4</sub>C یکی دیگر از مزیت‌های تحقیق حاضر است.

### بخش تجربی

**شبیه‌سازی ترمودینامیکی.** قبل از تهیه مواد و ساخت نمونه کامپوزیتی، به منظور بررسی ترمودینامیکی واکنش‌ها و محصولات آن از نرم افزار HSC Chemistry 6.0 استفاده شد. این نرم افزار یک نرم افزار ترمودینامیکی است که می‌توان با آن به ارزیابی ترمودینامیک خوردگی مواد مهندسی، سینتیک خوردگی، متالورژی استخراجی، دیاگرام فازها، معادلات ترمودینامیکی برای انجام شدن یا نشدن واکنش پرداخت. به کمک این نرم افزار می‌توان برهم‌کنش بین عناصر و فازهای مختلف موجود در سیستم را از لحاظ ترمودینامیکی پیش‌بینی نمود. با در نظر گرفتن این مطلب، تمامی واکنش‌های قابل انجام در حضور آلیاژ A356، نانوذرات B<sub>4</sub>C و پیش مواد تولید نانوذرات TiB<sub>2</sub> در دمای صفر تا ۱۰۰۰°C (دمای کاری مورد نیاز برای ساخت کامپوزیت تحقیق حاضر) مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱ عناصر آلیاژ آلومینیوم A356

عنصر	Al	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Ti	Zn	Pb
درصد وزنی	باقی مانده	۷/۰۱	۰/۴۳	۰/۰۳	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۳	<۰/۰۱



شکل ۱ تصویر SEM از میکروذرات B<sub>4</sub>C

Oxford Tescan که مجهز به شناساگر EDS ساخت شرکت Oxford Instruments استفاده شد.

در این پژوهش به منظور شناسایی فاز تقویت کننده  $TiB_2$  از دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD) با فیلامنت تنگستنی و زاویه کم (SAXS (Small Angle X-ray Scattering)) ساخت شرکت فیلیپس مدل D6792 کشور هلند استفاده شد. در مرحله آماده-سازی نمونه به منظور تشخیص فازهای تشکیل شده در حین فرآیند درجا، نمونه‌ها در هیدروکلریک اسید (Hydrochloric Acid (HCl)) قرار داده شدند تا پس از حذف آلومینیوم A356 فازهای تشکیل شده مورد آنالیز قرار گیرند.

**بررسی خواص مکانیکی.** برای تعیین خواص کششی نمونه‌های کامپوزیتی از دستگاه کشش ساخت شرکت سنتام (Santam) ایران مدل STM-50 با دقت جابجایی  $0.05\ mm$  و استاندارد ASTM E8M [18] استفاده شد. به منظور ارزیابی سختی کامپوزیت‌ها از آزمون سختی برینل طبق استاندارد ASTM E10 و دستگاه ESE WAY مدل DVRB.M با نیروی  $60\ kgf$  و قطر فرورونده  $1\ mm$  استفاده شد. انجام آزمون‌های مکانیکی برای هر گروه از نمونه‌ها ۳ بار بوده که داده‌های گزارش شده میانگین آزمون‌های انجام شده است.

## نتایج و بحث

**شبیه‌سازی واکنش‌ها.** در این مرحله ابتدا شبیه‌سازی کامپوزیت  $A356/B_4C$  مورد بررسی قرار گرفت. جدول (۳) شرایط در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی واکنش ترمودینامیکی کامپوزیت  $A356/B_4C$  را به ازای  $100$  کیلومول واکنش دهنده نشان می‌دهد. پس از در نظر گرفتن شرایط اولیه شبیه‌سازی، برهم‌کنش‌های مواد و عناصر موجود در سیستم از دمای  $25$  تا  $1000$  درجه سانتی‌گراد در فشار  $1$  اتمسفر بررسی شد.

شکل (۲) نتایج حاصل از شبیه‌سازی ترمودینامیکی را بر حسب دما-کیلومول نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مقادیر برخی از فراورده‌ها کم‌تر از  $0.05$  درصد است، بنابراین می‌توان از آن‌ها صرف نظر کرد.

فاز مخرب  $Al_3Ti$  به مقدار زیادی خود را نشان می‌دهد. علت این امر، فعال بودن بسیار تیتانیوم و میل آن به واکنش دادن است. البته در کنار حضور این فاز، کربن آزاد نیز در این نتایج

**ساخت نمونه‌ها.** ابتدا برای دستیابی به مخلوط یکنواخت پودرهای  $Na_3AlF_6$ ،  $K_2TiF_6$  و  $KBF_4$  با نسبت استوکیومتری  $1:1:2$  (به ترتیب  $10$ ،  $10$  و  $10$  گرم به ازای هر  $1000$  گرم آلومینیوم) بال میل با سرعت  $80$  دور بر دقیقه درون محفظه پلیمری استفاده شد. سپس پودر حاصل به درون مذاب حاوی  $B_4C$  و فاز زمینه در دمای  $1000^\circ C$  اضافه شد. به منظور توزیع یکسان پودر حاصل، مذاب به مدت  $10$  دقیقه توسط همزن مکانیکی مخلوط و مدت  $40$  دقیقه به منظور انجام واکنش پیش‌مواد در دمای  $1000^\circ C$  نگه‌داری شد [16,17]. به منظور جلوگیری از تشکیل اکسید آلومینیوم در تمامی مراحل فرآیند تولید اعم از ذوب و ریخته‌گری از گاز آرگون استفاده شد. بعد از مرحله ریخته‌گری تمامی نمونه‌ها تحت عملیات حرارتی  $T6$  قرار گرفتند. عملیات حرارتی  $T6$  در آلیاژ A356 بوسیله تغییر شکل تیغه‌های سیلیسیمی درون زمینه و ایجاد فاز جدید، باعث افزایش استحکام آلیاژ پایه خواهد شد. طبق استاندارد در این سیکل، نمونه تا دمای  $540$  درجه سانتی‌گراد حرارت داده و به مدت  $12$  ساعت در این دما نگهداری شد تا فرآیند انحلال سیلیسیم کامل شود. پس از آن، نمونه در آب  $80$  درجه سانتی‌گراد کوئنچ شده و برای فرآیند پیرسختی  $12$  ساعت در دمای  $155$  درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. شماره نمونه و درصد حجمی تقویت‌کننده‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲ شماره نمونه و درصد حجمی تقویت‌کننده‌ها

درصد حجمی افزودنی‌ها		شماره نمونه
$TiB_2$	$B_4C$	
۰	۰	۱
۰	۲/۵	۲
۰	۵	۳
۰	۷/۵	۴
۲/۵	۲/۵	۵

**بررسی میکروسکوپی و مشخصه‌یابی نمونه‌ها.** به منظور بررسی تغییرات ریزساختاری قبل و بعد از فرآیند  $T6$ ، کامپوزیت‌های تولید شده پس از آماده‌سازی سطحی توسط میکروسکوپ نوری اولامپوس (Olympus) مجهز به دوربین دیجیتال BX61 مورد مطالعه قرار گرفتند.

به منظور شناسایی تقویت‌کننده‌ها در کامپوزیت زمینه فلزی از میکروسکوپ الکترونی VEGA3 XMU ساخت شرکت



آن‌ها بترتیب می‌توان به فازهای مخرب  $AlB_2$ ،  $Al_4C_3$  و  $Al_3Ti$  با مقادیر حداکثر ۱۰، ۱/۵ و ۰/۱۷ کیلومول (فلش قرمز در تصویر شکل ۲) و فاز تقویت‌کننده  $TiB_2$  با مقدار ۰/۱۱ کیلومول (فلش سبز در تصویر شکل ۲) اشاره کرد.

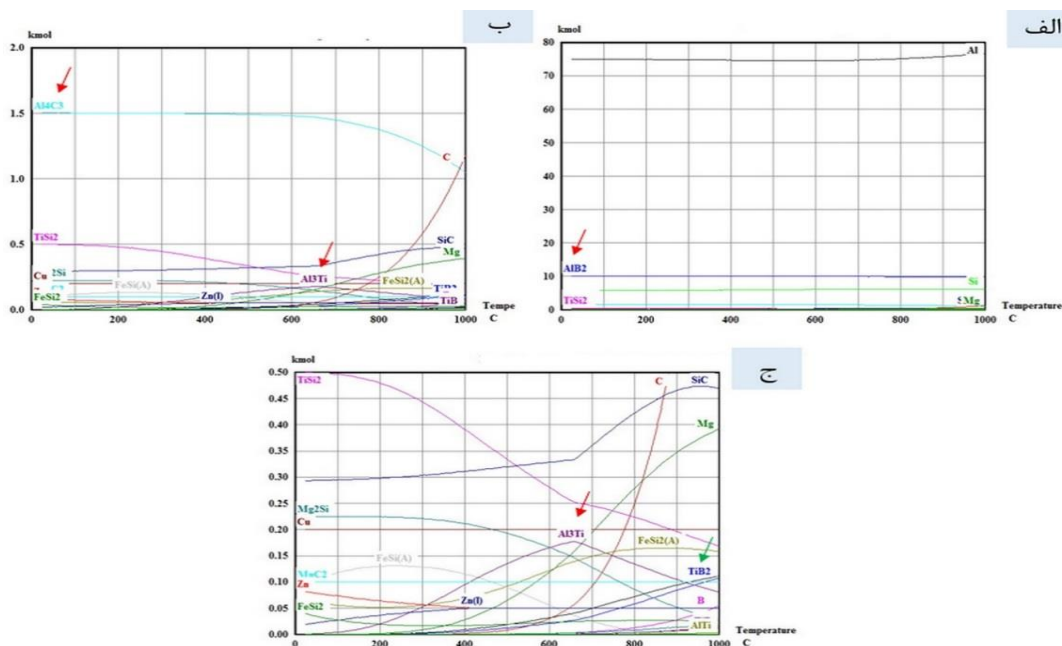
در مرحله بعد شبیه‌سازی کامپوزیت  $A356/B4C+TiB_2$  مورد بررسی قرار گرفت. جدول (۴) شرایط در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی واکنش ترمودینامیکی کامپوزیت را به ازای ۱۰۰ کیلومول نشان می‌دهد.

قابل مشاهده است. در واقعیت این کربن آزاد با فاز  $Al_3Ti$  واکنش داده و فاز  $TiC$  بوجود خواهد آمد که به عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت به ایفای نقش خواهد پرداخت. همچنین می‌توان پیش‌بینی نمود که فاز  $Al_3Ti$  با فازهای  $Al_4C_3$  و  $AlB_2$  وارد واکنش شده و فازهای  $TiC$  و  $TiB_2$  بدست خواهند آمد. علاوه بر این، با توجه به روش ترکیب نمک‌های فلزی برای ایجاد واکنش درجا، احتمال بوجود آمدن فاز  $Al_3Ti$  کمتر شده و کنترل آن آسان‌تر خواهد بود. فراوردهای زیادی از شبیه‌سازی ترمودینامیکی کامپوزیت  $A356/B4C$  به دست آمد که از مهم‌ترین

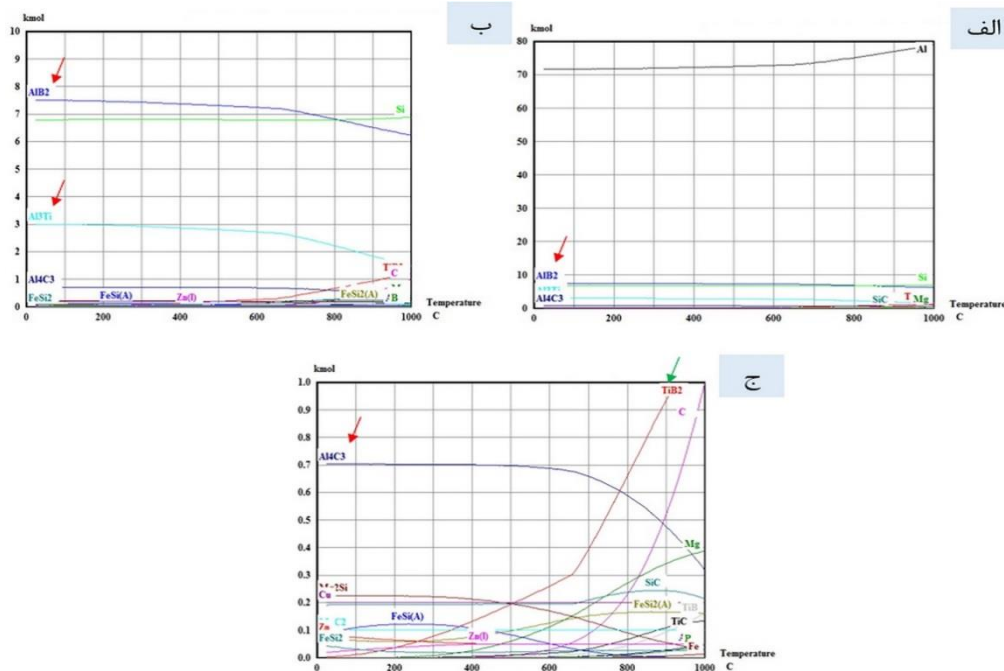
جدول ۳ شرایط اولیه در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی

فرآیند ساخت کامپوزیت  $A356/B4C$

Species Formula	Amount %	MW g/mol	Dens g/ml
PHASE 1:	100		
$N_2(g)$	1.960784 3	22.4136	1.229
$Al_4C_3$	0	143.95917	2.3599999
$B_4C$	98.03921 6	55.250999	2.52
$MgC_2$	0	48.327	0
$MnC_2$	0	78.959999	0
$SiC$	0	40.0965	3.1600001
$TiC$	0	59.910999	4.9299998
PHASE 2:	100		
Al	90.95	26.981541	2.7
$AlB_2$	0	48.60154	3.1900001
$AlTi$	0	74.881538	0
$Al_3Ti$	0	128.84462	0
B	0	10.81	2.3399999
C	0	12.011	2.26
Cu	0.2	63.546001	8.96
Fe	0.2	55.847	7.8600001
$FeSi(A)$	0	83.932503	6.0999999
$FeSi_2$	0	112.018	4.7399998
$FeSi_2(A)$	0	112.018	0
Mg	0.45	24.305	1.74
$Mg_2Si$	0	76.695503	1.99
Mn	0.1	54.938	7.4299998
Si	7.5	28.085501	2.329
Ti	0.5	47.900002	4.506
$TiB$	0	58.709999	0
$TiB_2$	0	69.519997	4.3800001
$TiSi$	0	75.985497	0
$TiSi_2$	0	104.071	4
Zn	0.1	65.379997	7.1399999
$Zn(l)$	0	65.379997	7.1399999



شکل ۲ نتیجه شبیه‌سازی ترمودینامیکی کامپوزیت  $Al\ 356/B_4C$  (الف) ۰ تا ۸۰ کیلومول، (ب) ۰ تا ۲ کیلومول و (ج) ۰ تا ۰/۵ کیلومول.



شکل ۳ نتیجه شبیه‌سازی ترمودینامیکی کامپوزیت  $Al\ 356/B_4C+TiB_2$  (الف) ۰ تا ۸۰ کیلومول، (ب) ۰ تا ۱۰ کیلومول و (ج) ۰ تا ۱ کیلومول.

علاوه بر افزایش خواص استحکامی و سایشی کامپوزیت، فازهای مخرب موجود در آن را نیز کاهش داد و در نتیجه آن، خواص مکانیکی قطعه نهایی به دلیل کاهش فازهای مخرب نیز افزایش خواهد یافت. فازهای مخرب  $AIB_2$ ،  $Al_4C_3$  نسبت به کامپوزیت  $Al\ 356/B_4C$  برترتیب تا ۸/۵ و ۰/۷ کیلومول کاهش پیدا کرده است اما مقدار  $Al_3Ti$  به ۳ کیلومول افزایش پیدا کرده است.

پس از در نظر گرفتن شرایط اولیه شبیه‌سازی، برهم‌کنش‌های مواد و عناصر موجود در سیستم از دمای ۲۵ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در فشار ۱ اتمسفر بررسی شد. با مشاهده شکل (۳) و مقایسه آنها با شکل (۲) می‌توان دید که فازهای مخرب به مقدار زیادی کاهش می‌یابند. همچنین با در نظر داشتن برهم‌کنش‌های بین فازهای  $Al_4C_3$ ،  $AIB_2$ ،  $Al_3Ti$  و  $C$  می‌توان گفت با اضافه شدن دی‌بورید تیتانیم به فرآیند ساخت کامپوزیت  $Al\ 356/B_4C$  می‌توان

- بررسی نتایج پراش اشعه ایکس. روابط استوکیومتری ۱ تا ۶
- واکنش‌های انجام شده برای تهیه تقویت‌کننده  $TiB_2$  را نشان می‌دهد. شکل (۴) آنالیز XRD از نمونه ۵ را نشان می‌دهد. با توجه به آنالیز پراش اشعه ایکس شکل (۴) نمونه ۵ علاوه بر فاز  $TiB_2$ ، فازهای دیگری نیز تشکیل شده‌اند. در این نمونه با شکسته شدن پیوند بین  $TiO_2$ ، تیتانیوم آزاد شده و با بور آزاد شده از  $KBF_4$  واکنش داده و  $TiB_2$  تشکیل می‌شود. همچنین علاوه بر فاز تقویت‌کننده  $TiB_2$  ترکیب بین فلزی  $Al_3Ti$  نیز دیده می‌شود که در شبیه‌سازی ترمودینامیکی واکنش نیز پیش‌بینی شده بود.
- (۱)  $4Al+3TiO_2 \rightarrow 3Ti+2Al_2O_3$
- (۲)  $KBF_4 \rightarrow KF+BF_3$
- (۳)  $2Al+2BF_3+Ti \rightarrow TiB_2+2AlF_3$
- (۴)  $2Na_3AlF_6+2TiO_2 \rightarrow 2Na_2TiF_6+Na_2O+Al_2O_3$
- (۵)  $Na_2TiF_6+2KBF_4 \rightarrow TiB_2+2NaF+2KF+5F_2$
- (۶)  $Al_2O_3+2Na_3AlF_6 \rightarrow 3Na_2O+4Al+6F_2$

جدول ۴ شرایط اولیه در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی فرآیند ساخت

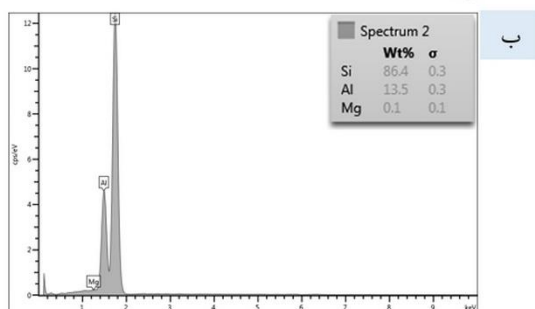
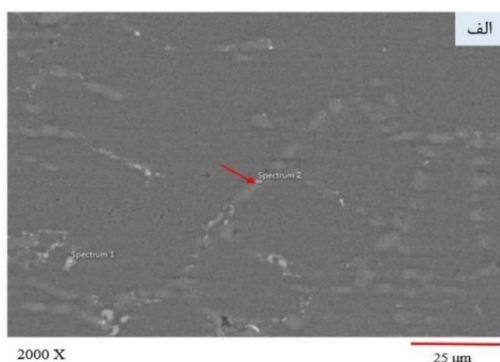
کامپوزیت  $A356/B_4C+TiB_2$

Species Formula	Amount %	MW g/mol	Dens g/ml
PHASE 1:	100		
N2(g)	3.846154	22.4136	1.229
Al4C3	0	143.95917	2.3599999
B4C	96.15385	55.250999	2.52
MnC2	0	78.959999	0
SiC	0	40.0965	3.1600001
TiC	0	59.910999	4.9299998
PHASE 2:	100		
Al	84.60465	26.981541	2.7
AlB2	0	48.60154	3.1900001
AlTi	0	74.881538	0
Al3Ti	0	128.84462	0
B	4.651163	10.81	2.3399999
C	0	12.011	2.26
Cu	0.186047	63.546001	8.96
Fe	0.186047	55.847	7.8600001
FeSi(A)	0	83.932503	6.0999999
FeSi2	0	112.018	4.7399998
FeSi2(A)	0	112.018	0
Mg	0.418605	24.305	1.74
Mg2Si	0	76.695503	1.99
Mn	0.093023	54.938	7.4299998
Si	6.976744	28.085501	2.329
Ti	2.790698	47.900002	4.506
TiB	0	58.709999	0
TiB2	0	69.519997	4.3800001
Zn	0.093023	65.379997	7.1399999
Zn(l)	0	65.379997	7.1399999

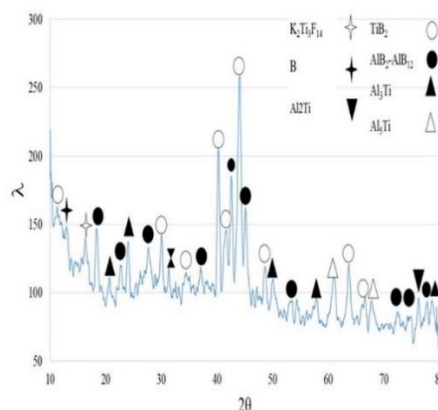
به نمونه بدون تقویت کننده (نمونه ۱) می شود. اما افزایش  $B_4C$  به اندازه ۵ و ۷/۵٪ حجمی (نمونه های ۳ و ۴) بترتیب افزایش ۲۹ و ۴۲ درصدی استحکام کششی نسبت به نمونه بدون تقویت کننده را به دنبال دارد. بعد از مرحله ریخته گری تیغه هایی از جنس Si در زمینه آلومینیومی شکل می گیرد.

شکل (۶) تصویر میکروسکوپ الکترونی و EDS نمونه ۱ را نشان می دهد که به منظور صحت سنجی جنس تیغه ها گرفته شد. EDS گرفته شده از ناحیه نشان داده شده در شکل (۶-الف) به وضوح حضور مقدار زیادی Si را نشان می دهد.

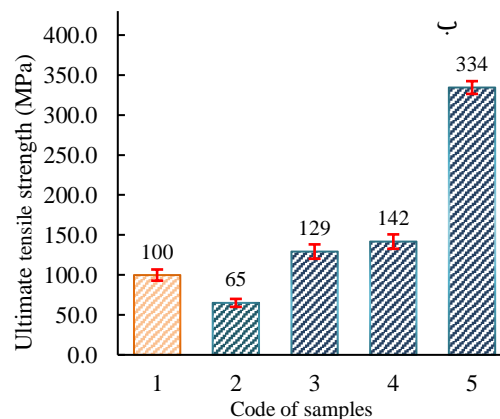
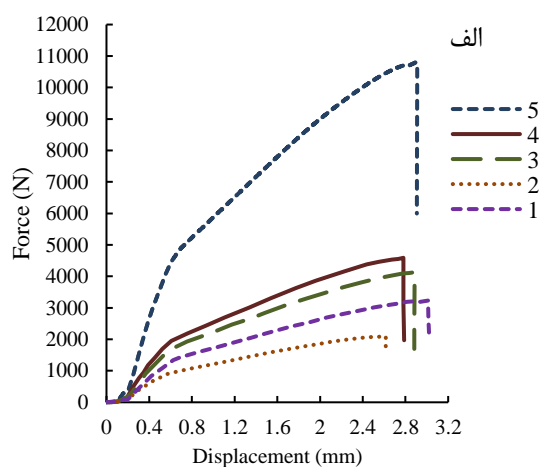
شکل (۷) تصویر میکروسکوپ نوری قبل و بعد از عملیات T6 از نمونه ۱ را نشان می دهد. قبل از عملیات T6 تجمع Si بصورت تیغه ای بوده و چسبندگی مناسبی با زمینه ندارد. بعد از عملیات T6 تیغه ها در زمینه حل شده و به شکل ذره ای توزیع یکنواختی به خود گرفته است (شکل ۷-ب). علاوه بر این عدم وجود تخلخل بعد از عملیات T6 در نمونه ۱ باعث می شود این نمونه خواص بهتری از خود نشان دهد. شکل (۸) تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه ۲ را نشان می دهد. میکروذرات  $B_4C$  در فصل مشترک تیغه های Si و زمینه تجمع کرده و از تقسیم و توزیع یکنواخت Si بعد از عملیات T6 جلوگیری کرده و باعث افت خواص کششی نسبت به نمونه بدون تقویت کننده می شود.



شکل ۶ الف) تصویر SEM ب) آنالیز EDS از نمونه ۱ (بدون تقویت کننده) بعد از عملیات T6



شکل ۴ الگوی پراش اشعه X نمونه ۵

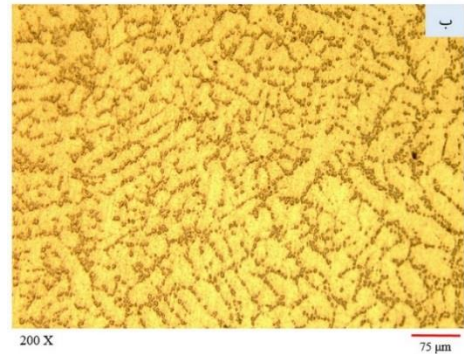
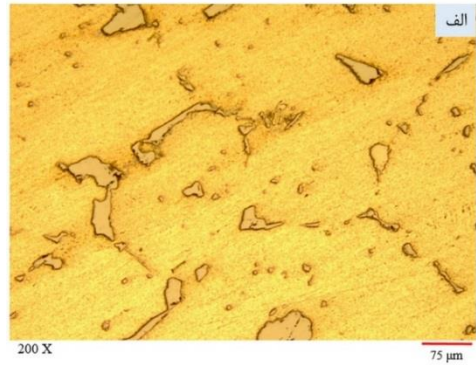
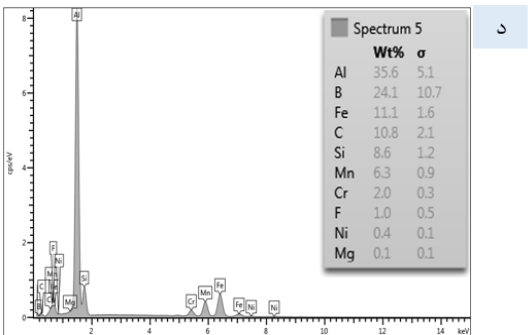
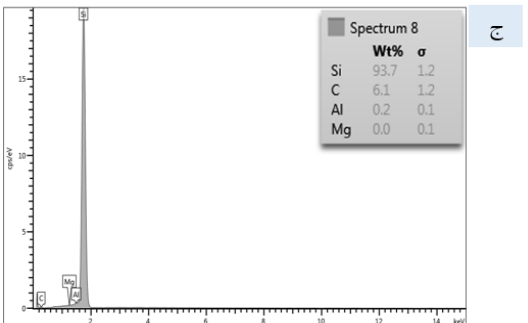
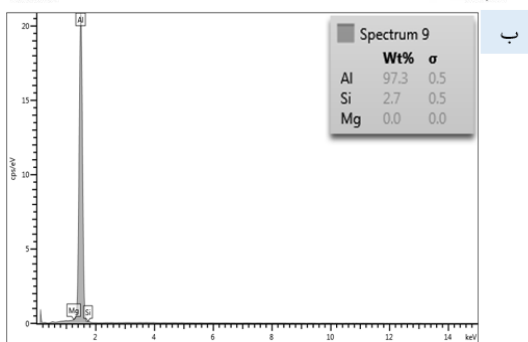
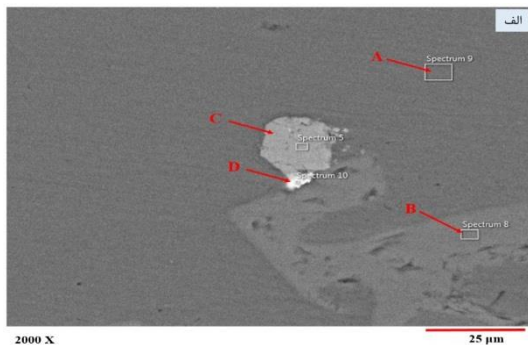


شکل ۵ الف) نمودار نیرو-جابجایی ب) استحکام کششی نهایی کامپوزیت های  $356/B_4C+TiB_2$

### خواص مکانیکی

استحکام کششی نهایی کامپوزیت ها. شکل (۵) نمودار نیرو-جابجایی و استحکام کششی کامپوزیت های زمینه A356 تقویت شده با نانوذرات  $B_4C$  و  $TiB_2$  را نشان می دهد. افزودن ۲/۵٪ حجمی  $B_4C$  (نمونه ۲) باعث کاهش ۳۵ درصدی استحکام نسبت

می‌کند. این ترکیب بین فلزی ترد بوده و در اثر اعمال بار کم‌تر باعث جدایش بین زمینه و تیغه Si می‌شود. وجود عناصر Pb نیز در EDS گ **b** (شکل ۹-د) از منطقه D نشان دهنده حضور سرب در این ناحیه است که در افت خواص مکانیکی نقش تعیین کننده دارد. تجمع میکروذرات به علت انرژی سطحی بالای این ذرات، خود به تنهایی عاملی برای تمرکز تنش است که این تمرکز تنش در حین آزمون کشش باعث شکست نمونه در تنش‌های کم‌تر می‌شود [19].



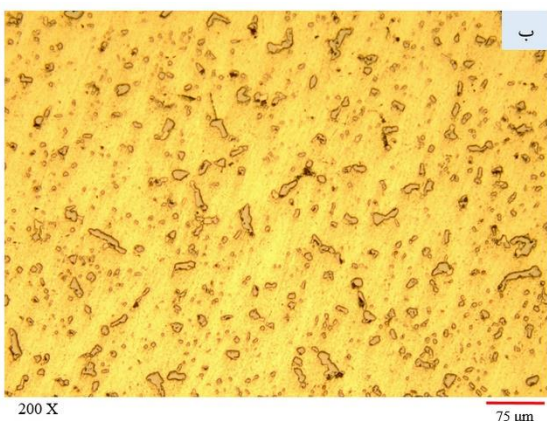
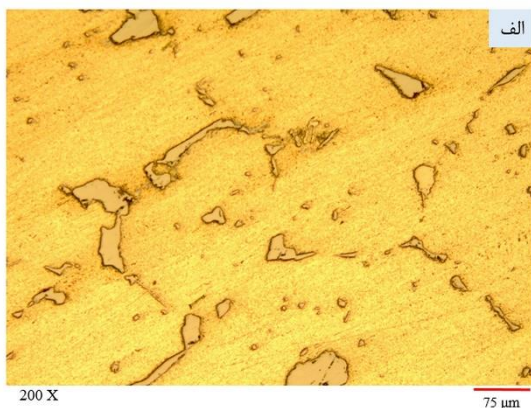
شکل ۷ تصویر میکروسکوپ نوری نمونه ۱ (بدون تقویت‌کننده) الف) قبل از عملیات T6 و ب) بعد از عملیات T6



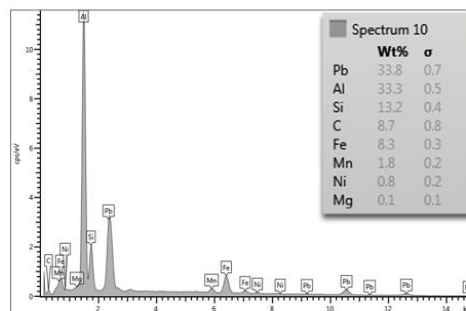
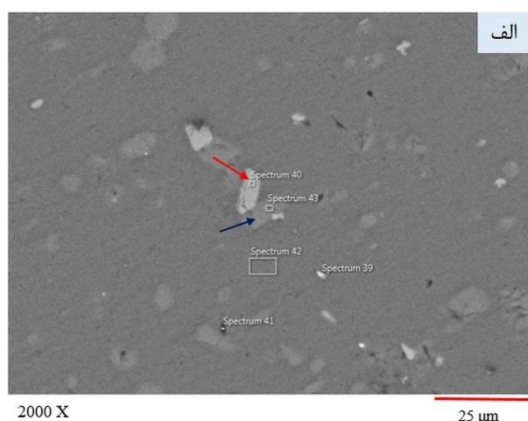
شکل ۸ تصویر میکروسکوپ نوری نمونه ۲ (حاوی ۲/۵٪ حجمی B<sub>4</sub>C) بعد از عملیات T6

شکل‌های (۹-ب تا ۹-ه)، EDS از نواحی مختلف تصویر SEM شکل ۹-الف را نشان می‌دهند. در شکل‌های (۹-ب و ۹-ج) به ترتیب EDS نواحی غنی از آلومینیوم و Si قابل رویت است و در شکل (۹-ج) که فصل مشترک بین نواحی غنی از آلومینیوم و Si است، وجود عناصر B و C نشان دهنده میکروذرات B<sub>4</sub>C در این فصل مشترک است. بنابراین میکروذرات B<sub>4</sub>C از نفوذ مذاب به داخل تیغه‌های Si و تجزیه آن جلوگیری می‌کند. علاوه بر این وجود تخلخل در فصل مشترک‌ها افت خواص در این نمونه را باعث می‌شود. همچنین تصویر میکروسکوپی و EDS شکل (۹) وجود ترکیب بین فلزی α- Al<sub>15</sub>(FeMn)<sub>3</sub>Si در فصل مشترک بین زمینه و تیغه Si را تایید

اندازه ذرات  $TiB_2$  نانو تشخیص داده شده و درصد اتمی موجود برای  $Ti$  و  $B$  به روابط استوکیومتری نزدیک است. توزیع یکسان تقویت‌کننده‌ها و وجود نانوذرات  $TiB_2$  در زمینه دلیل بهبود استحکام کششی نمونه نسبت به زمینه بدون تقویت‌کننده است. هنگام اعمال نیرو، تنش از طریق فصل مشترک از زمینه به تقویت‌کننده منتقل شده و در نتیجه باعث افزایش استحکام می‌شود [19,22].



شکل ۱۰ تصویر میکروسکوپ نوری (الف) نمونه ۳ (حاوی ۵٪ حجمی  $B_4C$ ) (ب) نمونه ۴ (حاوی ۷٪ حجمی  $B_4C$ )

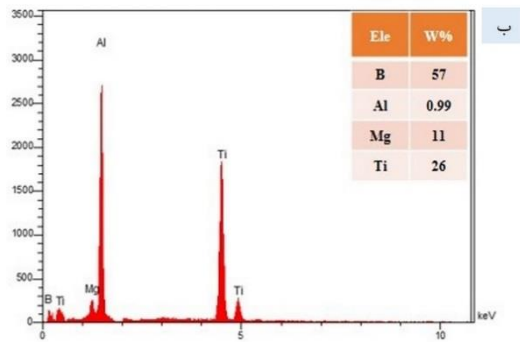


شکل ۹ (الف) تصویر SEM نمونه ۲ (حاوی ۲٪ حجمی  $B_4C$ )، (ب) آنالیز EDS از ناحیه A نمونه ۲، (ج) آنالیز EDS از ناحیه B، (د) آنالیز EDS از ناحیه C و (ه) آنالیز EDS از ناحیه D

شکل (۱۰) تصویر میکروسکوپ نیروی از کامپوزیت‌های حاوی ۵ و ۷٪ حجمی  $B_4C$  بعد از عملیات T6 را نشان می‌دهد. در نمونه‌های ۳ و ۴ با افزایش درصد حجمی  $B_4C$  در هنگام تشکیل تیغه‌های  $Si$  ذرات تقویت‌کننده آن‌ها را احاطه کرده و از رشد آن‌ها جلوگیری می‌کند. به همین دلیل تیغه‌ها ظریف‌تر شده و شکل کروی به خود می‌گیرند. شکل‌های (۱۱-الف و ب) تصویر SEM و EDS نمونه ۴، حضور  $Si$  به شکل ذره را در این نمونه تایید می‌کند. همچنین ترکیب بین فلزی  $\alpha-Al_{15}(FeMn)_3Si$  در فصل مشترک بین زمینه و تیغه  $Si$  نیز دیده می‌شود (شکل ۱۱-ج).

در مطالعه‌ای مشابه ساین و همکاران [20] تاثیر افزودن  $B_4C$  بر خواص مکانیکی زمینه آلومینیومی AA 6061 را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد استحکام کششی و میکروسختی با افزودن میکروذرات  $B_4C$  افزایش می‌یابد. همچنین سائیراج و همکاران [21] تاثیر افزودن  $B_4C$  بر خواص سختی و کششی زمینه AA 6061 را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردن سختی و استحکام کششی کامپوزیت ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت.

نمونه ۵ حاوی ۲٪ حجمی  $B_4C$  و ۲٪ حجمی  $TiB_2$  بیشترین استحکام کششی را نسبت به سایر نمونه‌ها دارد به طوری که نسبت به نمونه بدون تقویت‌کننده ۲۳۵٪ بهبود از خود نشان می‌دهد. تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه ۵ نشان‌دهنده توزیع مناسب تقویت‌کننده‌ها در زمینه است (شکل ۱۲). به منظور بررسی صحت انجام واکنش درجا برای تهیه  $TiB_2$  از میکروسکوپ SEM و EDS استفاده شد. شکل (۱۳) نتایج حاصل از SEM و EDS برای نمونه ۵ نشان می‌دهد که در آن

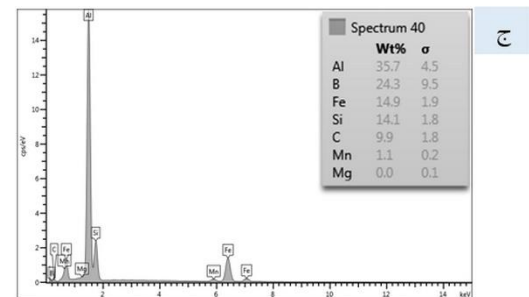
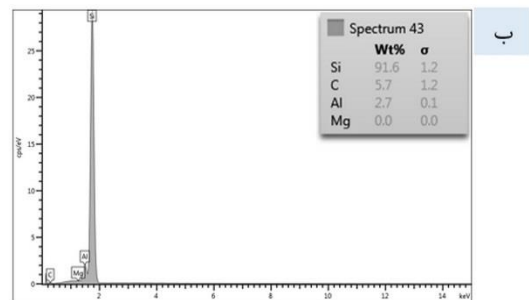


شکل ۱۳ الف) تصویر SEM نمونه ۵، ب) آنالیز EDS از نانوذرات  $TiB_2$  در نمونه ۵ بعد از عملیات T6

**سختی کامپوزیت‌ها.** در آزمون سختی سه منطقه از هر نمونه مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول (۵) آورده شده است. سختی نیز رفتار مشابهی خواص کششی را ارائه داد. به طوری که در نمونه ۲ حدود ۱۳ درصد افت سختی نسبت به نمونه بدون تقویت کننده دیده می‌شود. تجمع و خوشه‌ای شدن میکروذرات  $B_4C$  در اطراف تیغه‌ها و ذرات Si باعث تمرکز تنش در این نمونه شده و سختی نمونه کاهش پیدا می‌کند. اما افزایش  $B_4C$  در نمونه‌های ۳ و ۴ بترتیب افزایش ۱۰ و ۱۳ درصدی سختی نسبت به نمونه بدون تقویت کننده را به دنبال دارد. بهبود خواص سختی نسبت به استحکام کششی در اثر افزودن ذرات تقویت کننده کم‌تر است که علت آن چگالی پایین میکروذرات  $B_4C$  در مقایسه با زمینه آلومینیومی باعث می‌شود این ذرات به سطح منتقل شده و عمل تجمع در اطراف تیغه‌های سیلیسی در سطح بیشتر رخ دهد از بهبود بیشتر خواص حاصل از تقویت کننده‌ها جلوگیری می‌کند. بیشترین سختی را نمونه ۵ نسبت به سایر نمونه‌ها دارد به طوری که نسبت به نمونه بدون تقویت کننده ۳۳٪ بهبود از خود نشان می‌دهد.

جدول ۵ نتایج از آزمون سختی نمونه‌های کامپوزیتی

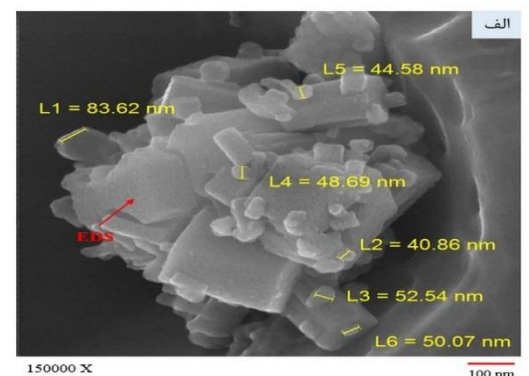
شماره نمونه	حداکثر سختی	حداقل سختی	میانگین سختی
۱	۱۱۱/۶	۱۱۱/۶	۱۱۱/۶
۲	۹۷/۵	۹۷/۱	۹۷/۳
۳	۱۲۰/۶	۱۱۹/۵	۱۲۰/۱
۴	۱۲۵/۱	۱۲۷/۱	۱۲۶/۳
۵	۱۴۸/۶	۱۴۹/۵	۱۴۹/۲



شکل ۱۱ الف) تصویر SEM نمونه ۴، ب) آنالیز EDS از ذره‌های نمونه ۴ (فلش آبی ۱۱-الف)، ج) آنالیز EDS از ناحیه فصل مشترک نمونه ۴ بعد از عملیات T6 (فلش قرمز ۱۱-الف)



شکل ۱۲ تصویر میکروسکوپ نوری نمونه ۵ (حاوی ۲/۵٪ حجمی  $B_4C$  و ۲/۵٪ حجمی  $TiB_2$ )



### نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، تاثیر ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد حجمی میکروذرات  $B_4C$  و ۲/۵٪ حجمی نانوذرات  $TiB_2$  بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت زمینه آلومینیوم A356 مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

۱- انجام عملیات حرارتی T6 در نمونه بدون تقویت کننده باعث شکستن تیغه های Si شده و باعث بهبود ریزساختار شد اما در نمونه حاوی ۲/۵٪ حجمی  $B_4C$  تجمع میکروذرات در فصل مشترک تیغه های Si و زمینه از خرد شدن ذرات طی عملیات حرارتی T6 جلوگیری کرد.

۲- طبق شبیه سازی ترمودینامیکی انجام شده توسط نرم افزار HSC Chemistry 6.0، فرآوری ۲/۵٪ درصد حجمی نانوذرات  $TiB_2$  در کامپوزیت A356/ $B_4C$  باعث کاهش ترکیبات بین فلزی مضر در ساختار کامپوزیت می گردد.

۳- افزودن تقویت کننده  $B_4C$  ابتدا باعث کاهش و سپس باعث افزایش استحکام کششی نهایی و سختی شد. بیشترین استحکام کششی و سختی مربوط به نمونه حاوی ۲/۵٪ حجمی  $B_4C$  و ۲/۵٪ حجمی  $TiB_2$  و کم ترین آن ها مربوط به نمونه حاوی ۲/۵٪ حجمی  $B_4C$  بود.

### مراجع

- Alizadeh, A. and Abdollahi, M., "Investigation on the microstructure and tensile properties of Al5083-TiB2 nanocomposites produced by stir casting method", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, (2020).
- Arpatappeh, F. A., Azghan, M. A. and Eslami-Farsani, R., "The effect of stacking sequence of basalt and Kevlar fibers on the Charpy impact behavior of hybrid composites and fiber metal laminates", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 234, pp. 3270-3279, 2020.
- Kaczmar, J., Pietrzak, K. and Włosiński, W., The production and application of metal matrix composite materials. *Journal of materials processing technology*, Vol. 106, pp. 58-67, (2000).
- Rawal S.P., "Metal-matrix composites for space applications", *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 53, pp.14-17, (2001).
- Hosseini Abbandanak, S.N and Abdollahi, M., "Effect of graphene on the interfacial and mechanical properties of hybrid glass/Kevlar fiber metal laminates", *Journal of Industrial Textiles*, (2020).
- Mazahery, A. and Shabani M.O., "Characterization of cast A356 alloy reinforced with nano SiC composites", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, pp. 275-280, (2012).
- Ibrahim, I., Mohamed, F. and Lavernia, E., "Particulate reinforced metal matrix composites a review", *Journal of materials science*, Vol. 26, pp. 1137-1156, (1991).
- Kennedy, A., Karantzalis, A. and Wyatt, S., "The microstructure and mechanical properties of TiC and  $TiB_2$ -reinforced cast metal matrix composites", *Journal of Materials Science*, Vol 34, pp. 933-940, (1999).
- Xin-min, M., Rui-Juan, X., Hao, W. and Wei-min, W., "Electronic structure and chemical bond of titanium diboride", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*, Vol. 18, pp.11-14, (2003).
- Wang, Y., Fang, C., Zhou, L., Hashimoto, T., Zhou, X., Ramasse, Q. and Fan, Z., "Mechanism for Zr poisoning of Al-Ti-B based grain refiners", *Acta materialia*, Vol. 164, pp. 428-439, (2013).
- Ghasali, E., "Preparation of mullite/ $B_4C$  composites: a comparative study on the effect of heating methods", *Ceramics International*, Vol. 44, pp. 18743-18751, (2018).



12. Topcu, I., "Processing and mechanical properties of B<sub>4</sub>C reinforced Al matrix composites", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 482, pp. 516-521, (2019).
13. Souri, A., shanaghi, A., "Talezari A Effect of etching process of SiC particles on microstructure and mechanical properties of electromagnetic stir casting process of A357-SiC nanocomposite", *Advanced Ceramics Progress*, (2019).
14. Hedayatian, M., Vahedi, Kh., Nezamabadi, A.R. and Momeni, A., "Effect of graphene oxide reinforcement on the ballistic properties of Al6061- nanocomposites", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, pp. 401-410, (2019).
15. Wang, Y., Fang, C., Zhou, L., Hashimoto, T., Zhou, X., Ramasse, Q. and Fan, Z., "Mechanism for Zr poisoning of Al-Ti-B based grain refiners", *Acta materialia*, Vol. 164, pp. 428-439, (2019).
16. Chen, Z., Wang, T., Zheng, Y., Zhao, Y., Kang, H. and Gao, L., "Development of TiB<sub>2</sub> reinforced aluminum foundry alloy based in situ composites-Part I: An improved halide salt route to fabricate Al-5 wt% TiB<sub>2</sub> master composite", *Materials Science and Engineering*, Vol. 605, pp. 301-309, (2014).
17. Suresh, S., Shenbag, N., Moorthi, V., "Aluminium-titanium diboride (Al-TiB<sub>2</sub>) metal matrix composites: challenges and opportunities", *Procedia Engineering*, Vol. 38, pp. 89-97, (2012).
18. ASTM E8/E8M, "Standard test method for tension testing of metallic materials, Annual Book of ASTM Standards", ASTM International, West Conshohocken, PA, (2015).
19. [19] Harichandran, R., Selvakumar, N., "Effect of nano/micro B<sub>4</sub>C particles on the mechanical properties of aluminium metal matrix composites fabricated by ultrasonic cavitation-assisted solidification process", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 16, pp.147-158, (2016).
20. Singh, G., Singh, H., Singh, K., Vardhan, S. and Mohan, S., "Mechanical characterizations of the fabricated AA 6061 based composites reinforced with B<sub>4</sub>C particulates", *Materials Today: Proceedings*, (2022).
21. Sathiyaraj, S., Senthilkumar, A., Ameen, P. M., Sundar, R. and Saseendran, V., "Experimental investigations on mechanical properties of Al-B<sub>4</sub>C metal matrix composites", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 45, pp. 6372-6376, (2021).
22. Bhowmik, A., Dey, D. and Biswas, A., "Comparative study of microstructure, physical and mechanical characterization of SiC/TiB<sub>2</sub> reinforced aluminium matrix composite", *Silicon*, Vol. 13, pp. 2003-2010, (2021).

