



ساخت و ارزیابی خواص مکانیکی کامپوزیت درجا AA5083/TiB₂ به روش ریخته‌گری گردابی

علی علیزاده^{1*}، محسن حیدری بنی²، امین رضایی³، جعفر اسکندری جم⁴

- 1- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.
 2- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.
 3- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.
 4- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.
 * تهران، صندوق پستی 1774-15875، a_alizadeh@mut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

ساخت کامپوزیت‌های درجا به روش ریخته‌گری گردابی، تقویت‌کننده‌هایی با ابعاد ریزتر، ترشوندگی بیشتر و فصل مشترک تمیزتری بین ذرات تقویت‌کننده و زمینه را در مقایسه با کامپوزیت‌های غیر درجا (در این روش تولید) ایجاد می‌کند. هدف از این پژوهش ساخت و بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت درجا AA5083/TiB₂ تولید شده به وسیله فرآیند ریخته‌گری گردابی است. به همین منظور، کامپوزیت‌هایی با 2، 4 و 6 درصد وزنی ذرات TiB₂ تولید و با آلیاژ آلومینیوم 5083 (فاقد TiB₂) مقایسه شدند. ابتدا به منظور پاک‌سازی ناخالصی‌های موجود در پودرهای TiO₂ و B₂O₃، عملیات پیش‌گرم کردن بر روی آن‌ها اعمال و سپس عملیات آسیاکاری با سرعت 750 دور بر دقیقه به مدت 15 ساعت، به منظور فعال‌سازی مکانیکی پودرها و ایجاد فازهای واسطه انجام شد. پس از آماده‌سازی پودرها، با نسبت استوکیومتری مشخص به مذاب آلیاژ آلومینیوم 5083 اضافه شدند و بعد از هم‌زدن با سرعت 350 دور بر دقیقه به مدت 15 دقیقه، ریخته‌گری انجام شد. در پایان به منظور بهبود خواص قطعات ریخته‌گری شده از فرآیند اکستروژن گرم استفاده شد. سپس با استفاده از آنالیز فازی، آنالیز میکرو ساختار و آزمون‌های کشش، سختی و دانسیته تولید یا عدم تولید، توزیع ذرات تقویت‌کننده و خواص مکانیکی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده بهبود خواص مکانیکی نمونه‌ها با افزایش ذرات TiB₂ تا مقدار 4٪ وزنی پس از عملیات تکمیلی بود. به طوری که بیشترین استحکام کششی و سختی و کمترین درصد ازدیاد طول نسبی در نمونه ریخته‌گری و اکستروژن شده (در دمای 330 °C) برای AA5083/4Wt.%TiB₂ به‌دست آمد. استحکام کششی، سختی و درصد ازدیاد طول این کامپوزیت به ترتیب 470 MPa، 114 BHN و 6.92٪ است.

دریافت: 1403/06/10

پذیرش: 1403/08/28

کلیدواژگان

کامپوزیت زمینه فلزی درجا، دی‌بورید تیتانیوم (TiB₂)، ریخته‌گری گردابی، اکستروژن گرم.

Fabrication and mechanical properties of AA5083/TiB₂ in situ composite by stir casting process

Ali Alizadeh^{*1}, Mohsen Heydari Beni¹, Amin Rezaei¹, Jafar Eskandari Jam¹

1- Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
 * P.O.B. 1774-15875, Tehran, Iran, a_alizadeh@mut.ac.ir

Keywords

In-situ metal matrix composite,
 Diboride titanium (TiB₂),
 Stir casting,
 Hot Extrusion.

Abstract

The in-situ fabrication of composites using the vortex casting method produces finer-sized reinforcements, improved wettability, and a cleaner interface between the reinforcing particles and the matrix compared to ex-situ composites (using this production method). The objective of this research is to fabricate and investigate the mechanical properties of in-situ AA5083/TiB₂ composites produced via the vortex casting process. For this purpose, composites with 2, 4, and 6 wt% TiB₂ particles were produced and compared with the AA5083 aluminum alloy without TiB₂. Initially, to remove impurities from the TiO₂ and B₂O₃ powders, a preheating treatment was applied, followed by milling at a speed of 750 rpm for 15 hours to activate the powders mechanically and to form intermediate phases. After preparing the powders, they were added to the molten AA5083 alloy in a specific stoichiometric ratio, and casting was carried out after stirring at 350 rpm for 15 minutes. To enhance the properties of the cast parts, hot extrusion was applied. Subsequently, the absence of TiB₂, the distribution of the reinforcing particles, and the mechanical properties of the samples were examined using phase analysis (XRD), microstructural analysis (OM and SEM), and tensile, hardness, and density tests. The results indicate an improvement in the mechanical properties of the samples with an increase in TiB₂ particles up to 4 wt% after post-processing. The highest tensile strength and hardness, and the lowest percentage of relative elongation were observed in the cast and extruded sample (at 330°C) for AA5083/4 wt% TiB₂. The tensile strength, hardness, and elongation percentage of this composite were 470 MPa, 114 BHN, and 6.92%, respectively.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Alizadeh, A., Heydari Beni, M., Rezaei, A., Eskandari Jam, J., "Fabrication and mechanical properties of AA5083/TiB₂ in situ composite by stir casting process," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 11, No. 3, pp. 2525-2535, 2024.
<https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2033110.1896>

1- مقدمه

بهبود مستمر خواص مواد برای پیشرفت علم و تکنولوژی امری ضروری است. در سال‌های اخیر، طراحی مواد با تأکید بر سبکی، نسبت استحکام به وزن بالا، سازگاری با محیط‌زیست و هزینه‌های تولید پایین تغییر کرده است. به این ترتیب کامپوزیت‌های زمینه فلزی¹ به دلیل داشتن این مزیت‌ها، مورد توجه محققان و صنعتگران بسیاری واقع شده‌اند و آن‌ها را می‌توان به‌عنوان جایگزین‌های مناسبی برای آلیاژهای متداول در اکثر قطعات فلزی صنعتی به‌ویژه قطعات اتومبیل، صنایع هوایی و نظامی استفاده کرد. به‌طور کلی کامپوزیت‌های زمینه فلزی شامل یک فاز زمینه و یک فاز تقویت‌کننده هستند که در آن‌ها فاز زمینه اغلب آلیاژ و فاز تقویت‌کننده معمولاً از جنس سرامیک است. آلومینیوم به دلیل ارزانی، سبکی و سایر خواص مطلوب رایج‌ترین زمینه‌ی برای کامپوزیت‌های زمینه فلزی است.

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات دارای استحکام و مدول ویژه بالا و مقاومت به سایس مناسب بوده و نسبت به آلیاژهای آلومینیوم رایج، از خواص عالی دما بالا برخوردارند و از این رو می‌توانند در صنایع مختلف نظامی، حمل و نقل، هوایی و خودروسازی مورد استفاده قرار گیرند. در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی از قبیل ریخته‌گری گردابی²، کوبشی³، دایکاست⁴ و غیره به‌منظور تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. که در این میان روش ریخته‌گری گردابی به دلیل ارزانی و سهولت تولید به صورت وسیع در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد[1]. در میان انواع تقویت‌کننده‌های سرامیکی، دی‌بورید تیتانیوم (TiB₂)⁵ از جمله تقویت‌کننده‌هایی است که دارای خواص منحصر به فردی از قبیل خواص مکانیکی و سایشی مطلوب بوده، و توجه صنایع و پژوهشگران را به خود جلب نموده‌اند. اخیراً به دلیل بهبود مشکلات ناشی از فرآیند تولید و ایجاد خواص مکانیکی مطلوب، ساخت کامپوزیت‌های ریخته‌گری Al/TiB₂ به روش درجا مورد توجه محققین قرار گرفته است[2]. در فرآیند درجا فاز زمینه و تقویت‌کننده هر دو از آلیاژ مذاب ایجاد می‌شوند. روش درجا یکی از روش‌های جدید ساخت کامپوزیت‌ها است که در آن فاز تقویت‌کننده داخل زمینه تشکیل می‌شود. با کنترل ذوب و ترکیب واکنش‌دهنده، می‌توان دامنه وسیعی از اکسیدها، کاربیدها، نیتريد‌ها، سیلیکات‌ها و بوراید‌ها را تولید نمود. با شناخت مشخصات و ویژگی‌های اختلاط و انتخاب صحیح و مناسب فازهای واکنش‌دهنده می‌توان فعالیت‌ها، غلظت‌ها، اندازه و توزیع فازهای تقویت‌کننده را کنترل نمود[3]. روش ریخته‌گری گردابی روشی خاص، قابل قبول و کاربردی در بین انواع روش‌های تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی است. مطابق بررسی‌های انجام شده توسط محققین، هزینه‌های تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی به روش ریخته‌گری گردابی تقریباً 30 تا 50 درصد نسبت به سایر روش‌های تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی کمتر است[4 و 5]. مهم‌ترین مزایای فرآیند ریخته‌گری گردابی نسبت به سایر روش‌ها، ساده بودن فرآیند، تکرارپذیری فرآیند، عدم محدودیت در تولید قطعات پیچیده و بزرگ و مقرون به صرفه بودن آن‌ها است[6]. از پژوهش‌های انجام گرفته در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

ساخت نانو کامپوزیت‌های TiB₂ / (Al-10Zn) به روش متالورژی مایع واکنشی و اکستروژن گرم برای بهبود پیوندهای بین‌سطحی و خواص مکانیکی[7]، بررسی افزایش استحکام و مدول الاستیسیته در کامپوزیت‌های

ماتریس Mg-Li-Al تقویت‌شده با ذرات TiB₂ خارجی از طریق ریخته‌گری به روش هم‌زدن[8]، بررسی تأثیر نانوذرات ZrB₂ و Al₂O₃ بر ریزساختار و خواص مکانیکی درزهای جوش داده‌شده با روش هم‌زدن اصطکاکی در کامپوزیت‌های ماتریس آلومینیوم 7085 درجا[9]، بررسی تأثیر سرعت اکستروژن بر خواص سیم کامپوزیت Cu-5 vol.% Ti₂SnC ساخته‌شده به روش اکستروژن برگشتی با هم‌زدن اصطکاکی[10]، مطالعه بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ماتریس آلومینیوم nano-ZrB₂/AA6016 با عملیات پردازش به روش هم‌زدن اصطکاکی پس از نورد گرم[11]، بررسی استحکام و مقاومت به سایس بی‌نظیر در کامپوزیت AA7075/TiB₂ ساخته‌شده به روش ادغام اصطکاکی[12]، سنتز و شناسایی کامپوزیت ماتریس آلومینیوم AA7075/TiB₂ تولیدشده از طریق روش ریخته‌گری به روش هم‌زدن[13]، بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت ماتریس فلزی درجا Al7075-TiB₂ نورد گرم شده[14]، شناسایی ریزساختاری و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ماتریس آلومینیوم 6061 تقویت‌شده با TiB₂ با استفاده از روش ریخته‌گری به روش هم‌زدن[15]، تولید کامپوزیت هیبریدی AA7075/TiB₂-Al₂O₃ به روش درجا با استفاده از ریخته‌گری گردابی[16].

با توجه به تحقیقات انجام گرفته پژوهشی در زمینه ساخت و ارزیابی خواص مکانیکی کامپوزیت درجا AA5083/TiB₂ به روش ریخته‌گری گردابی یافت نشد و پژوهش‌ها در نوع آلیاژ، مواد و روش ساخت متفاوت بودند. هدف از این پژوهش، ساخت کامپوزیت AA5083/TiB₂ به‌وسیله روش ترکیبی، آسیاکاری مکانیکی پودرهای Al، TiO₂ و B₂O₃ با واکنش درجا در مذاب AA5083 است. مورفولوژی، اندازه و توزیع ذرات درجا کامپوزیت به خوبی توسط آنالیزهای فازی و میکروساختار ارزیابی شدند. خواص کششی کامپوزیت توسط آزمون کشش و تأثیر ذرات TiB₂ درجا بر میکرو ساختار و خواص مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت.

2- بیان مسئله پژوهش

برای انجام پژوهش ابتدا مواد اولیه، تجهیزات و مراحل آزمون تجربی به ترتیب به تفصیل شرح داده شده است و نتایج آزمون استخراج و مورد بررسی قرار گرفتند.

2-1- مواد اولیه

در این پژوهش، از آلیاژ آلومینیوم Al5083 (جدول 1) به عنوان زمینه‌ی کامپوزیت استفاده شده که دارای چگالی 2.66gr/cm³ است.

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم Al5083.

Table 1 The chemical composition of the aluminum alloy Al5083.

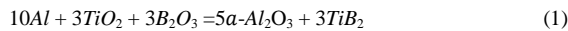
Ti	Ni	Zn	Mn	Mg	Cu	Fe	Si	Al	عنصر
0.15	0.02	0.25	1.2	4.5	0.1	0.4	1.2		درصد وزنی
									باقیمانده

شمس موردنظر، توسط اره نواری به قطعات تقریبی 500 گرمی تبدیل شده تا بتوان به راحتی آن را در بوته قرار داد و به تعداد مورد نیاز قطعات برای آزمون‌ها و عملیات تکمیلی ایجاد کرد. پودر دی‌اکسید تیتانیوم با اندازه ذرات تقریبی 60μm، چگالی 4.23gr/cm³ و با خلوص 92 درصد، پودر تری‌اکسید بور با اندازه ذرات تقریبی 75μm، چگالی 1.43gr/cm³ و با خلوص

⁴ Die casting
⁵ titanium diboride

¹ Metal matrix composites
² Stir casting
³ Squeeze casting

5083 استفاده شد. مقادیر استوکیومتری واکنش به‌گونه‌ای محاسبه شده بود که پس از انجام واکنش شیمیایی (در حین فرآیند تولید) 2/4، 4/4 و 6/4 وزنی ذرات TiB₂ باقی بماند. در ابتدا به‌منظور پاک‌سازی ناخالصی‌ها، آلودگی‌های سطحی و مولکول‌های آب موجود در پودرهای TiO₂ و B₂O₃، عملیات پیش‌گرم کردن در دمای 250 °C به مدت 3 ساعت در یک کوره الکتریکی انجام شد. سپس پودرهای پاک‌سازی شده‌ی TiO₂ و B₂O₃ به همراه پودر آلومینیوم خالص در درون آسیاب قرار داده شدند. برای جلوگیری از اکسید شدن پودرها حین فرآیند فعال‌سازی مکانیکی، عملیات آسیابکاری تحت جریان گاز آرگون انجام شد. پیش از آسیابکاری نیز محفظه آسیاب به مدت 1 دقیقه تحت جریان گاز آرگون قرار گرفت. به‌منظور فعال‌سازی مکانیکی پودرها نسبت وزنی گلوله به پودر 15:1، زمان آسیابکاری 15 ساعت و سرعت دوران 750 دور بر دقیقه در نظر گرفته شد. فرآیند آسیابکاری مکانیکی به‌منظور فعال‌سازی پودرها (TiO₂, B₂O₃, Al) و انجام واکنش ناقص بین آن‌ها انجام شد. هدف از انجام عملیات آسیابکاری تولید فاز TiB₂ در اثر واکنش زیر در دماهای پایین‌تر از دمای مذاب است که متعاقباً این واکنش در حین فرآیند ریخته‌گری گردابی تکمیل می‌شود.

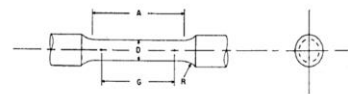


سپس آلیاژ آلومینیوم 5083 داخل بوته پیش‌گرم شده قرار گرفت و دمای کوره تا 750 °C جهت ذوب آن افزایش یافت. شایان ذکر است که بالای کوره توسط عایق پنبه نسوز پوشش داده شد. پس از ذوب شدن آلیاژ، پودرهای آسیابکاری شده مطابق استوکیومتری واکنش جهت دستیابی به مقادیر 2/4، 4/4 و 6/4 وزنی ذرات TiB₂ به آن اضافه گردید. برای تسهیل در اضافه کردن پودرها به مذاب و بهبود الحاق، آن‌ها توسط میله فولادی در چند مرحله به درون مذاب تزریق شدند. پس از اضافه کردن پودرها، جهت پخش یکنواخت آن‌ها در مذاب، هم‌زن مکانیکی با سرعت 350 دور بر دقیقه گرداب موردنظر را ایجاد کرد و پس از 15 دقیقه هم‌زدن، مذاب داخل قالب ریخته شد تا سرد شود. بیلتهای ساخته شده به‌ترتیب دارای قطر و ارتفاع 30mm و 100mm هستند. به‌منظور انجام عملیات تکمیلی اکستروژن، بیلته ساخته شده داخل قالب اکستروژن قرار گرفت. این قالب دارای نسبت ابعادی 9:1 بود. جهت کم کردن اصطکاک بین قالب و نمونه از روان‌ساز گرافیتی مولیکت استفاده شد. این روان‌ساز به نمونه، سنبه، فضای داخلی و سوراخ انتهایی قالب زده شد تا اصطکاک بین سنبه، قالب و نمونه کاهش یابد و عمل اکستروژن کردن با نیروی کم‌تری انجام شود. از یک کوره‌ی مقاوم‌تری که به شکل استوانه دور قالب محتوی قطعه‌ی کامپوزیتی قرار می‌گیرد برای گرم کردن قطعه تا دمای 400 °C استفاده شد سپس نمونه را به مدت تقریبی 45 دقیقه داخل قالب گذاشته تا قالب و نمونه هم‌دما شوند، و در پایان فشار توسط دستگاه پرس اعمال گردید. در شکل 2 تصویر قطعه کامپوزیت AA5083/TiB₂ قبل و بعد از اکستروژن گرم نشان داده شده است. فلوجارت ساخت کامپوزیت AA5083/TiB₂ در شکل 3 ارائه شده است. آزمایش کشش متداول‌ترین آزمایش برای تعیین خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها است. هدف از انجام آزمایش کشش تعیین استحکام کششی، استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول نسبی نمونه‌ها در دمای محیط است. در این پژوهش نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM E8 ساخته شدند و آزمایش کشش بر روی آن‌ها با سرعت 1 mm/s انجام شد.

94 درصد و پودر آلومینیوم خالص با اندازه ذرات تقریبی 85µm، چگالی ظاهری 1.43gr/cm³ و با خلوص 99.99 درصد به منظور انجام آزمون در نظر گرفته شد. اصولاً وجود اصطکاک در فرآیند اکستروژن موجب افزایش نیروی فشار لازم برای شکل‌دهی، سایش قالب و افزایش دمای ناشی از آن می‌شود. از این رو به‌منظور کاهش اصطکاک بین نمونه و قالب اکستروژن و در نتیجه کم کردن نیروی مورد نیاز برای عملیات اکستروژن از یک روان‌ساز استفاده می‌شود. در این پژوهش از روان‌ساز گرافیتی مولیکوت¹ (محصول کمپانی داوکورنینگ - مولیکوت آلمان) استفاده گردید.

2-2- تجهیزات

از ترازوی دیجیتال آزمایشگاهی مدل کسل² با دقت 0.01 گرم برای توزین پودرهای دی‌اکسید تیتانیوم، تری‌اکسید بور و آلومینیوم خالص استفاده شد. آسیاب مورد استفاده در این پژوهش، آسیاب گلوله‌ای از نوع سایشی مجهز به سیستم خنک‌کننده‌ی آبگرد است. محفظه‌ی آسیاب از جنس فولاد زنگ نزن و با حجم سه لیتر است و از گلوله‌هایی از جنس فولاد زنگ نزن با قطر 4.8mm استفاده شد. به‌منظور ذوب کردن آلیاژ و انجام عملیات کامپوزیت‌سازی از کوره دارای المنت‌هایی در دیواره با حداکثر توانایی دمایی 1200 °C و بوت‌های از جنس Gr-SiC استفاده گردید. هم‌زن مکانیکی متشکل از پروانه گرافیتی، موتور الکتریکی و میله فولادی جهت اتصال پروانه به موتور الکتریکی به‌منظور تولید دوغاب کامپوزیتی است. به‌منظور تولید نمونه‌های اولیه کامپوزیتی و شکل‌دهی مذاب از یک قالب فولادی استفاده شد. برای انجام عملیات اکستروژن قطعات کامپوزیتی، از یک قالب اکستروژن با نسبت 9:1 از جنس فولاد گرم کار H13 استفاده گردید. عملیات اکستروژن با یک دستگاه پرس هیدرولیک 700bar انجام پذیرفت. همچنین از دستگاه چگال‌سنج، میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ روبشی به عنوان تجهیزات آزمایشگاهی بهره گرفته شد. برای تعیین استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیتی از دستگاه آزمون کشش استفاده شد. نمونه‌های آزمون کشش طبق استاندارد ASTM E8 مطابق شکل 1 به صورت میل‌گرد ساخته شدند [17]. برای تعیین سختی از دستگاه ای‌سی‌ای وی³ مدل DVRB.M استفاده شد.



Standard Specimen	Small-Size Specimens Proportional to Standard				
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G—Gage length	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	36.0 ± 0.1 [1.450 ± 0.005]	24.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.005]	16.0 ± 0.1 [0.640 ± 0.005]	10.0 ± 0.1 [0.450 ± 0.005]
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.360 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.005]	2.5 ± 0.1 [0.113 ± 0.002]
R—Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]
A—Length of reduced section, min (Note 2)	56 [2.25]	45 [1.75]	30 [1.25]	20 [0.75]	16 [0.625]

Fig. 1 ASTM E8 Standard for the Fabrication of Tensile Test Specimens[21].

شکل 1 استاندارد ASTM E8 جهت ساخت نمونه‌های آزمون کشش [17].

2-3- مراحل آزمون

جهت ساخت کامپوزیت AA5083/TiB₂ پودرهای دی‌اکسید تیتانیوم، تری‌اکسید بور، آلومینیوم خالص با نسبت استوکیومتری به ترتیب با درصد مولی 10:3:3 و شمش آلیاژ آلومینیوم 5083 به‌عنوان مواد خام مورد استفاده قرار گرفتند. به‌منظور تولید هر نمونه کامپوزیتی از 500 گرم شمش آلومینیوم

³ ESE WAY

¹ Molykote

² ksl

می‌دهند. با توجه به شکل 4 به خوبی می‌توان توزیع نامناسب ذرات تقویت‌کننده و ذرات توده‌ای شده را مشاهده کرد. وجود ذرات توده‌ای شده می‌تواند باعث ایجاد تخلخل در فصل مشترک بین ذرات تقویت‌کننده و زمینه قطعه کامپوزیتی شود که این مشکل به دلیل عدم ترشوندگی مناسب ذرات توده‌ای با آلیاژ زمینه است. وجود تخلخل در فصل مشترک باعث ایجاد نواحی مستعد به تمرکز تنش در قطعه و در نتیجه موجب رشد ترک از این نواحی و کاهش خواص مکانیکی کامپوزیت خواهد شد.

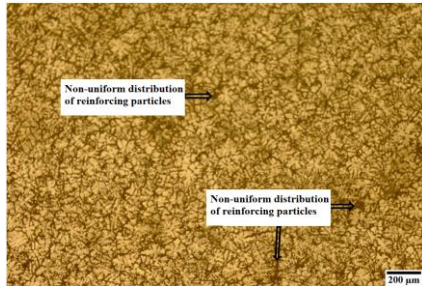


Fig. 4 Optical Microscope Image of the Cast AA5083/2%TiB₂ Sample. شکل 4 تصویر میکروسکوپ نوری نمونه ریخته‌گری AA5083/2%TiB₂.

در شکل 4 مشاهده شد که اندازه و توزیع ذرات تقویت‌کننده و همچنین اندازه دانه‌ها تغییر کرده است. با مقایسه شکل‌های 4 و 5 مشخص شد که انجام فرآیند اکستروژن از طریق اعمال تنش‌های زیاد به قطعه کامپوزیتی باعث شکسته شدن و کاهش ذرات توده‌ای از طریق بسته شدن خلل و فرج‌ها شده است.

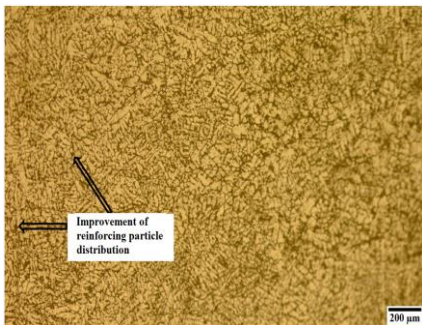


Fig. 5 Optical Microscope Image of the Extruded AA5083/2%TiB₂ Sample. شکل 5 تصویر میکروسکوپ نوری نمونه اکستروژن شده AA5083/2%TiB₂.

در شکل 6 مشاهده شد که با افزایش ذرات TiB₂ به 4/ و 6/ وزنی، ذرات توده‌ای شده و تخلخل‌ها افزایش می‌یابند. در این پژوهش بیشترین مقادیر ذرات توده‌ای شده در میان تمامی نمونه‌ها مربوط به نمونه ریختگی C6 (AA5083/6%TiB₂) بود. زیرا به علت افزایش ذرات جامد TiB₂ درون مذاب، سیالیت در حین فرآیند مخلوط کردن (هم‌زدن) کاهش و حجم گازهای محبوس شده در مذاب افزایش پیدا کرده و در نتیجه خروج گازها از درون مذاب در حین فرآیند انجماد دشوارتر شده است. همچنین بدیهی است که با افزایش ذرات TiB₂ به مذاب AA5083 تجمع آن‌ها با یکدیگر افزایش می‌یابد. این موضوع با ریزتر شدن ذرات تقویت‌کننده قابل‌ملاحظه‌تر شد. در تحقیقی کوکن¹ و همکارانش [18] این مسئله را در مورد کامپوزیت Al-SiC گزارش کردند.



Fig. 2 Image of the AA5083/TiB₂ Composite A) Before Extrusion B) After Hot Extrusion.

شکل 2 تصویر قطعه کامپوزیت AA5083/ TiB₂ قبل فرآیند اکستروژن (a) بعد از اکستروژن گرم.

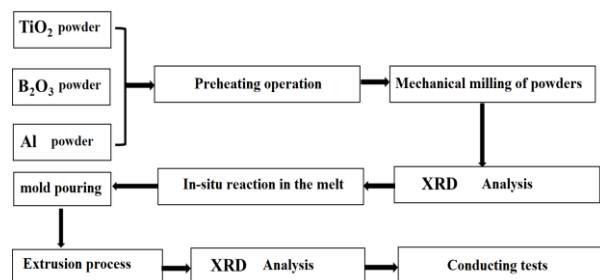


Fig. 3 Flowchart of the AA5083/TiB₂ Composite Fabrication Process. شکل 3 فلوچارت ساخت کامپوزیت AA5083/TiB₂.

9 نمونه جهت انجام آزمون ساخته شد و خواص آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت که مشخصات نمونه‌ها در جدول 2 آورده شده است.

جدول 2 نام و ترکیب نمونه‌های ساخته شده.

Table 2 Names and Composition of the Samples.

ردیف	نام نمونه	ترکیب
1	C0	آلیاژ آلومینیوم 5083 (پس از ریخته‌گری)
2	C2	کامپوزیت AA(5083)/2%TiB ₂ (پس از ریخته‌گری)
3	C4	کامپوزیت AA(5083)/4%TiB ₂ (پس از ریخته‌گری)
4	C6	کامپوزیت AA(5083)/6%TiB ₂ (پس از ریخته‌گری)
5	E0	آلیاژ آلومینیوم 5083 (پس از فرآیند اکستروژن در دمای 400°C)
6	E2	کامپوزیت AA(5083)/2%TiB ₂ (پس از فرآیند اکستروژن در دمای 400°C)
7	E4	کامپوزیت AA(5083)/4%TiB ₂ (پس از فرآیند اکستروژن در دمای 400°C)
8	E6	کامپوزیت AA(5083)/6%TiB ₂ (پس از فرآیند اکستروژن در دمای 400°C)
9	E4*	کامپوزیت AA(5083)/4%TiB ₂ (پس از فرآیند اکستروژن در دمای 330°C)

در نام‌گذاری نمونه‌ها حرف اول بیانگر فرآیند ساخت است. یعنی C یا Casting به معنای ریخته‌گری و E یا Extruded به معنای اکستروژن است. عدد ثبت شده بعد از حروف به معنی درصد TiB₂ موجود در کامپوزیت می‌باشد.

3- نتایج

3-1- بررسی تصاویر میکروسکوپ نوری

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها (متالوگرافی و پولیش) به منظور مشاهده توزیع ذرات تقویت‌کننده و تخلخل‌ها، قطعات توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفتند. شکل‌های 4 و 5 تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه کامپوزیتی AA5083/2%TiB₂ به ترتیب قبل و پس از فرآیند اکستروژن را نشان

¹ cocen

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده به مقادیر بیشتر از حد بهینه، تأثیر فرآیند اکستروژن در کاهش ذرات توده‌ای شده، کاهش پیدا می‌کند. در این پژوهش مقدار بهینه ذرات تقویت‌کننده چهار درصد وزنی بود.

3-2- بررسی اثر فرآیند اکستروژن بر ذرات تقویت‌کننده

یکی از مشکلات اصلی در تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی به روش ریخته‌گری گردابی، تشکیل ذرات توده‌ای شده در ساختار نهایی حین فرآیند تولید است. وجود ذرات توده‌ای شده به دلیل عدم ترشوندگی مناسب آن‌ها با آلیاژ زمینه می‌تواند باعث ایجاد تخلخل (خلل و فرج) در فصل مشترک بین ذرات تقویت‌کننده و فاز زمینه شود. بنابراین در فصل مشترک نیز باعث ایجاد نواحی مستعد به تمرکز تنش (نواحی جوله‌زنی و رشد ترک) و در نتیجه تضعیف خواص مکانیکی کامپوزیت می‌شود. ذرات توده‌ای شده به دلیل پیوند ضعیفشان تحمل تنش‌های زیاد را ندارند. فرآیند اکستروژن گرم به علت اعمال تنش‌های زیاد به نمونه باعث شکسته شدن ذرات توده‌ای شده می‌شود [18]. شکل 8 تصویر SEM ذرات توده‌ای شده قبل و بعد از فرآیند اکستروژن گرم (b) را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده شد که ذرات توده‌ای شده TiB₂ (نقاط روشن در مرز دانه) که در حین فرآیند ریخته‌گری گردابی ایجاد شده بودند، به دلیل پیوند ضعیفشان با اعمال فشارهای زیاد ناشی از فرآیند اکستروژن گرم شکسته و ریز شدند. همچنین در حین فرآیند تغییر شکل گرم فاز آلومینیوم زمینه به اطراف ذرات در حال شکسته شدن وارد شد و در نتیجه ذرات به صورت مناسب‌تر توزیع شدند. نتیجه این تحولات باعث افزایش خواص مکانیکی کامپوزیت AA5083/TiB₂ خواهد شد.

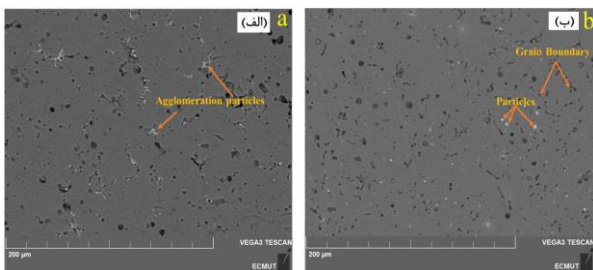


Fig. 8 SEM Image a) Before the Extrusion Process b) After the Extrusion Process.

شکل 8 تصویر SEM الف) قبل فرآیند اکستروژن ب) بعد از فرآیند اکستروژن.

3-3- بررسی اثر فرآیند اکستروژن بر تخلخل

شکل 9 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تخلخل در حالت ریختگی (الف) و پس از فرآیند اکستروژن (ب) را نشان داد. تشکیل تخلخل در طول فرآیند ریخته‌گری گردابی یکی از انواع عیوب رایج در کامپوزیت‌های ریختگی است. تخلخل‌های ایجاد شده در کامپوزیت ریختگی AA5083/TiB₂ به عنوان نواحی تمرکز تنش، مستعد به جوله‌زنی و رشد ترک هستند که در نتیجه وجود آن‌ها در ساختار نهایی باعث کاهش خواص مکانیکی کامپوزیت می‌شود. در این پژوهش به منظور کاهش یا حذف تخلخل‌ها از فرآیند اکستروژن گرم استفاده شد. همان‌گونه که در شکل 9 مشاهده می‌شود، پس از انجام فرآیند اکستروژن گرم به دلیل اعمال تنش‌های بسیار بالا به قطعه در حین فرآیند، تخلخل‌ها کاهش پیدا کردند. دلیل اصلی آن، سیلان پیدا کردن آلومینیوم در حین فرآیند تغییر شکل پلاستیک و ورود آن به درون تخلخل‌ها است که این امر تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش خواص مکانیکی کامپوزیت داشت [19].

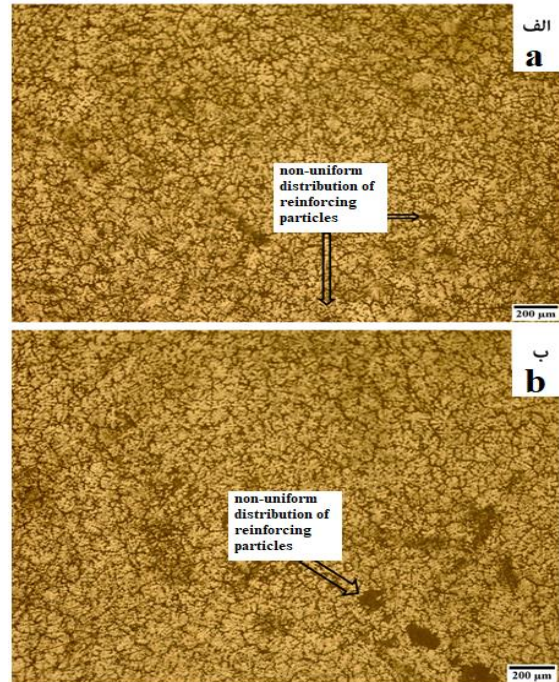


Fig. 6 Optical Microscope Image of the Cast Sample a) with 4% Reinforcing Particles and b) with 6% Reinforcing Particles.

شکل 6 تصویر میکروسکوپ نوری نمونه ریخته‌گری شده الف) با چهار درصد ذرات تقویت‌کننده و ب) با شش درصد ذرات تقویت‌کننده.

در تصویر الف) شکل 7 توزیع نسبتاً یکنواخت‌تری از ذرات تقویت‌کننده در فاز زمینه نسبت به تصویر ب) مشاهده شد.

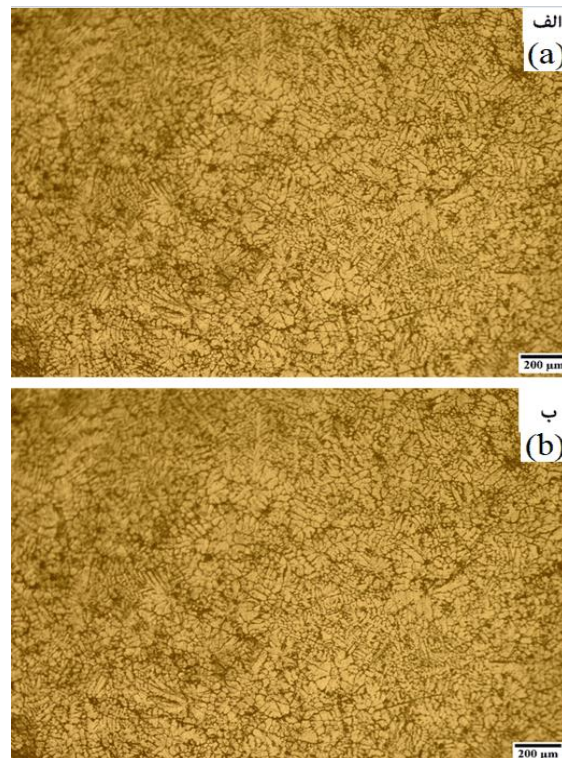


Fig. 7 Optical Microscope Image of the Extruded Samples a) with 4% Reinforcing Particles and b) with 6% Reinforcing Particles.

شکل 7 تصویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های اکستروژن شده الف) با چهار درصد ذرات تقویت‌کننده و ب) با شش درصد ذرات تقویت‌کننده.

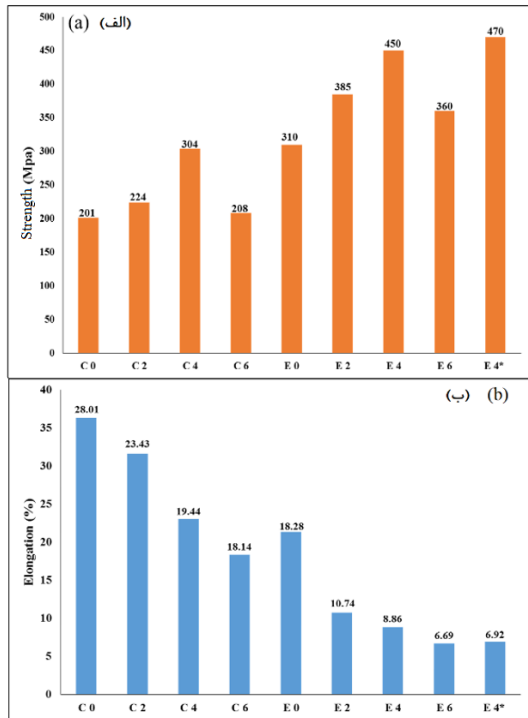


Fig. 10 Results from the Tensile Test: a) Tensile Strength and b) Percentage Elongation.

شکل 10 نتایج به‌دست آمده از آزمون کشش: (الف) استحکام کششی و (ب) درصد ازدیاد طول.

3-6- اثر فرآیند اکستروژن بر روی استحکام

تغییرات استحکام کششی نمونه‌های اکستروژن شده را می‌توان با استفاده از مکانیزم‌های هال-پیچ¹ توضیح داد. براساس مکانیزم هال-پیچ ارتباط بین تنش جریان² و اندازه دانه‌ها طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_o = \sigma_i + KD^{-1/2} \quad (3)$$

که در آن σ_o تنش تسلیم، σ_i تنش اصطکاکی (تنش مقاوم در برابر حرکت نابجایی‌ها)، D قطر دانه‌ها و K یک عدد ثابت است. طبق این رابطه، تنش تسلیم با اندازه دانه‌ها رابطه معکوس دارد؛ بنابراین با کاهش اندازه دانه‌ها، تنش تسلیم افزایش پیدا می‌کند [25]. شکل 11 مقایسه منحنی‌های تنش - کرنش نمونه‌های E0، E2، E3 و E4 را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص شد که فرآیند اکستروژن می‌تواند استحکام کششی را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش دهد. با افزایش ذرات تقویت‌کننده‌های TiB₂ ایجاد شده به روش درجا، در درون زمینه آلومینیومی موانع نابجایی‌ها و مکان‌های جوانه‌زنی افزایش و در نتیجه استحکام کششی کامپوزیت بهبود پیدا کرد. پس از انجام فرآیند اکستروژن در دمای 400°C استحکام کششی کامپوزیت‌های AA5083/TiB₂ به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش پیدا کرد و بیشترین استحکام کششی مربوط به نمونه E4 و برابر 450Mpa بود. به‌طور کلی با انجام فرآیند اکستروژن اندازه دانه فاز زمینه و ذرات تقویت‌کننده ریزتر، و ذرات توده‌ای شکسته شدند همچنین، تخلخل‌ها کاهش و استحکام فصل مشترک بین فاز زمینه و ذرات تقویت‌کننده افزایش یافت که نتیجه‌ی این تحولات منجر به افزایش استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیتی شد. با انجام فرآیند اکستروژن

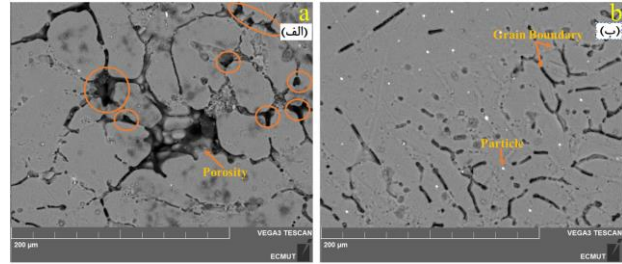


Fig. 9 SEM Image of Porosity a) in the As-Cast Condition b) After Extrusion.

شکل 9 تصویر SEM تخلخل (الف) در حالت ریختگی (ب) پس از اکستروژن.

به‌طور کلی فرآیند اکستروژن گرم از طریق اعمال تنش‌های زیاد به نمونه باعث کاهش تخلخل‌ها، شکسته شدن ذرات و توده ذرات، بهبود توزیع ذرات و در نتیجه افزایش استحکام کششی و سختی کامپوزیت می‌شود. شایان ذکر است که هرچه دمای اکستروژن کمتر باشد، مقدار کار سختی افزایش و علاوه بر ریز شدن دانه‌ها، حفره‌ها نیز کوچک‌تر می‌شوند [20].

3-4- بررسی آزمون کشش

به‌طور کلی خواص کششی کامپوزیت‌ها متأثر از خواص فاز زمینه، کسر حجمی ذرات تقویت‌کننده، شکل، اندازه و توزیع ذرات تقویت‌کننده، افزایش چگالی نابجایی‌ها به دلیل عدم تطابق مدول یانگ و ضرایب انبساط حرارتی ذرات تقویت‌کننده و زمینه، مکانیزم‌های استحکام دهی هال-پیچ و اوروان و ویژگی‌های فصل مشترک بین ذرات تقویت‌کننده و زمینه است. همچنین انجام عملیات تکمیلی اکستروژن به دلیل اعمال تنش‌های زیاد به نمونه باعث کاهش یا حذف حفره‌های ناشی از فرآیند ریخته‌گری و شکسته شدن ذرات توده‌ای شده که در مجموع خواص مکانیکی کامپوزیت را افزایش می‌دهد [21و22].

3-5- بررسی اثر درصد وزنی تقویت‌کننده بر روی استحکام

در شکل 10 نتایج به‌دست آمده از آزمون کشش شامل استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص شد که به‌تدریج با افزایش ذرات تقویت‌کننده TiB₂ (تا حد بهینه) در درون زمینه آلومینیوم 5083 و انجام فرآیند اکستروژن گرم استحکام کششی نمونه افزایش و درصد ازدیاد طول آن کاهش یافت.

شکل 11 مقایسه منحنی‌های تنش - کرنش نمونه‌های C0، C2، C3 و C4 را نشان می‌دهد. نمونه‌های تولید شده به روش ریخته‌گری به دلیل وجود ذرات توده‌ای شده دارای خواص مکانیکی نسبتاً نامطلوبی هستند. با بررسی تصاویر میکروسکوپی و توجه به منحنی‌های تنش - کرنش 10 مشخص شد که با افزایش ذرات تقویت‌کننده TiB₂ از 4٪ به 6٪ وزنی ذرات توده‌ای گازی بیش‌تر شوند. شایان ذکر است افزایش ذرات تقویت‌کننده TiB₂ تا مقدار بهینه 4٪ وزنی، باعث افزایش استحکام کششی کامپوزیت شده است. بر این اساس نمونه C4 بیشترین استحکام کششی (304 MPa) را در بین سایر نمونه‌های ریختگی دارد. دلیل بیشتر بودن استحکام کششی نمونه C4 حضور ذرات TiB₂ است؛ این ذرات در کامپوزیت AA5083/TiB₂ به‌عنوان مکان‌های جوانه‌زنی و رشد فاز زمینه و موانع مرزدانه‌ای باعث ریزدانه‌گی فاز زمینه و همچنین به‌عنوان موانعی در مسیر حرکت نابجایی‌ها مانع حرکت آسان آن‌ها و در نتیجه منجر به افزایش استحکام کششی کامپوزیت C4 شد [23].

² Flow Stress

¹ Hall-Petch

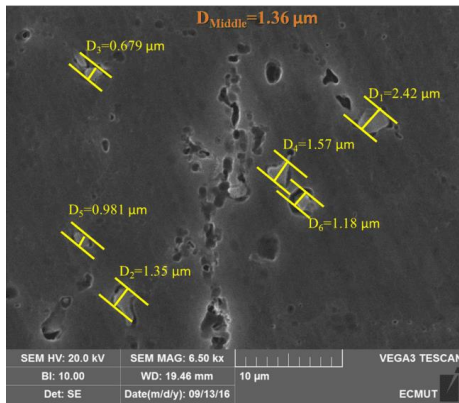


Fig. 13 Dimensions of TiB₂ Particles in Sample E4.

شکل 13 ابعاد ذرات TiB₂ در نمونه E4.

با توجه به منحنی‌های تنش - کرنش مشاهده شد که فرآیند اکستروژن قابلیت غلبه بر ذرات توده‌ای شده و تخلخل‌های ایجاد شده ناشی از افزایش ذرات تقویت‌کننده TiB₂ به مقدار 6٪ را نداشته و استحکام کششی نمونه E 4 از 450 Mpa به 360 Mpa کاهش پیدا کرد.

3-7- اثر دمای فرآیند اکستروژن بر روی استحکام

شکل 14 مقایسه منحنی‌های تنش - کرنش نمونه E4* و E4 را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص شد که با کاهش دمای اکستروژن از 400 °C به 330 °C استحکام کششی نمونه E 4 افزایش پیدا کرده است. بیشترین استحکام کششی در این پژوهش مربوط به نمونه E4* و برابر 470MPa است. دلیل اصلی آن این است که هرچه دمای انجام فرآیند اکستروژن گرم کمتر باشد، مقدار کار سختی ایجاد شده در نمونه‌ها بیشتر شده و علاوه بر ریز شدن دانه‌های فاز زمینه و ذرات تقویت‌کننده، حفره‌ها نیز کاهش یافته‌اند. با اعمال فشارهای زیاد ناشی از انجام فرآیند اکستروژن در دمای 330 °C به نمونه E 4 ذرات توده‌ای شده شکسته شدند و در نتیجه، تعداد موانع موجود در مسیر حرکت نابجایی‌ها افزایش یافته و بنابراین استحکام کششی افزایش پیدا کرد. همچنین انجام فرآیند اکستروژن در دمای 330°C به دلیل اعمال تنش‌های بیشتر نسبت به دمای 400°C به قطعه باعث فعال‌سازی و افزایش دانسیته نابجایی‌ها، و ایجاد مرزهای فرعی بیشتر شد که در نتیجه منجر به ریز شدن ساختار گردید؛ براین اساس، تعداد موانع موجود در مسیر حرکت نابجایی‌ها بیشتر شده و در نتیجه استحکام کششی نمونه E 4 افزایش پیدا کرد [27].

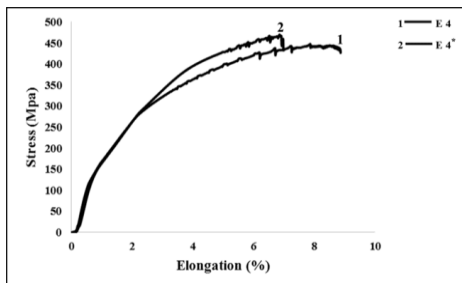


Fig. 14 Stress-Strain Curves for AA5083/4% TiB₂ Samples, Cast and Extruded at 330°C.

شکل 14 منحنی‌های تنش - کرنش نمونه AA5083/4% TiB₂ ریخته‌گری و اکستروژن شده در دمای 330 °C

همان‌طور که از نتایج آزمون‌های به عمل آمده بر روی نمونه‌ها مشخص است، با شرایط ساخت و عوامل مؤثری که در این تحقیق اعمال شده است

بر روی نمونه‌های ریخته‌گری اندازه دانه‌های فاز زمینه کاهش پیدا کرد؛ با کاهش اندازه دانه آلیاژ زمینه مساحت مرز دانه و در نتیجه موانع مسیر حرکت نابجایی و استحکام کامپوزیت افزایش پیدا کرد. همچنین با افزایش استحکام فصل مشترک بین ذرات تقویت‌کننده و زمینه مکانیزم انتقال بار از فاز زمینه به ذرات تقویت‌کننده افزایش یافت و در نتیجه منجر به ارتقاء استحکام کششی کامپوزیت AA5083/TiB₂ شد [20].

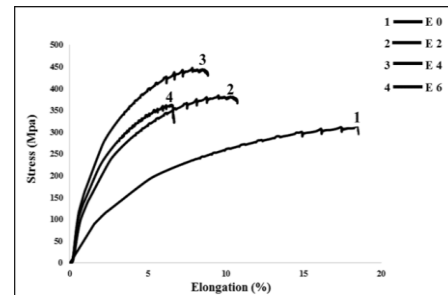


Fig. 11 Comparison of Stress-Strain Curves for Cast and Extruded Samples with Different Percentages of TiB₂ Reinforcing Particles.

شکل 11 مقایسه منحنی‌های تنش - کرنش نمونه‌های ریخته‌گری و اکستروژن شده با درصدهای متفاوت ذرات تقویت‌کننده TiB₂.

ضمناً همان‌گونه که در شکل 8 نشان داده شد انجام فرآیند اکستروژن منجر به شکسته و ریز شدن ذرات توده‌ای شد. استحکام بخشی ناشی از شکسته و ریز شدن ذرات توده‌ای شده TiB₂ را می‌توان از طریق مکانیزم اورووان توجیه کرد. رابطه اورووان به ابعاد و فاصله بین ذرات بستگی دارد:

$$\sigma \propto \frac{1}{L} \cdot \ln \frac{d}{b} \quad (4)$$

در این رابطه، σ افزایش تنش سیلان به علت حضور ذرات، L فاصله بین ذرات، d قطر ذرات و b بزرگی بردار برگرز است. طبق این رابطه اگر ابعاد ذرات ریز و فاصله بین آن‌ها کم باشد استحکام کامپوزیت به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. شکل‌های 12 و 13 به ترتیب توزیع و اندازه ذرات TiB₂ پس از فرآیند اکستروژن را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده شد فاصله ذرات نسبت به یکدیگر کم (77/9 μm) و اندازه آن‌ها ریز (36/1 μm) است. براین اساس با توجه به مکانیزم اورووان تعداد موانع موجود در مسیر حرکت نابجایی‌ها افزایش یافت و در نتیجه نابجایی‌ها در پشت ذرات TiB₂ قفل شده و موجب ایجاد کار سختی در قطعه شد. هم‌زمان با ایجاد کار سختی در قطعه، استحکام نیز افزایش پیدا کرد [26].

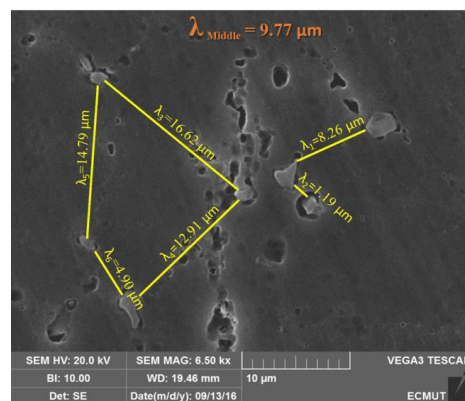


Fig. 12 Distance Between TiB₂ Particles in Sample E4.

شکل 12 فاصله ذرات TiB₂ نسبت به یکدیگر در نمونه E4.

جدول 4 نام و ترکیب نمونه‌های ساخته شده.

Table 4 Names and Composition of the Samples.

ردیف	نام نمونه	مقادیر سختی نمونه‌ها
1	C0	51
2	C2	62
3	C4	83
4	C6	67
5	E0	85
6	E2	94
7	E4	109
8	E6	98
9	E4*	114

در این پژوهش حد بهینه ذرات تقویت‌کننده 4٪ وزنی است. با توجه به شکل 14 مشاهده شد که با افزایش ذرات تقویت‌کننده از 4٪ به 6٪ وزنی سختی نمونه به دلیل افزایش تخلخل و ذرات توده‌ای شده و در نتیجه افزایش نواحی مستعد به تمرکز تنش از 83 BHN به 67 BHN کاهش پیدا کرده است.

3-9- بررسی اثر فرآیند اکستروژن بر سختی

با انجام فرآیند اکستروژن بر روی نمونه‌های ریخته‌گری تغییرات قابل توجهی در سختی آن‌ها مشاهده شد. با توجه به جدول 4 مشخص شد که سختی نمونه E 4* از سایر نمونه‌ها بیشتر است که دلیل اصلی آن کاهش تخلخل‌ها، بهبود استحکام فصل مشترک و توزیع ذرات تقویت‌کننده است. با تشکیل تخلخل‌های نسبتاً بزرگ، تمرکز تنش در این نواحی افزایش یافت و ترک‌ها توانستند از این نواحی جوانه‌زنی و رشد کنند و در نتیجه خواص مکانیکی کامپوزیت را کاهش دهند. برای کاهش این مشکل می‌توان از فرآیند اکستروژن کردن استفاده کرد. همچنین هرچه دمای اکستروژن کمتر باشد مقدار کار سختی بیش‌تر شده و علاوه بر ریز شدن دانه‌ها و ذرات تقویت‌کننده، تخلخل‌ها نیز کوچک‌تر می‌شوند. افزایش سختی در اثر انجام فرآیند اکستروژن را می‌توان به مکانیزم استحکام‌دهی پخشی¹ (مکانیزم اوروان) نسبت داد. چراکه با اعمال فشارهای زیاد ناشی از انجام فرآیند اکستروژن به نمونه‌های ریخته‌گری ذرات توده‌ای شکسته شده و در نتیجه تعداد موانع موجود در مسیر حرکت نابجایی‌ها و سختی نمونه افزایش پیدا کرد [19]. با کاهش دمای اکستروژن از 400 °C به 330 °C سختی نمونه E 4 به دلیل کاهش بیشتر تخلخل‌ها و ذرات توده‌ای، توزیع ذرات و افزایش استحکام فصل مشترک بهبود پیدا کرده است و از 109 BHN به 114 BHN افزایش یافت [31].

3-10- آزمون چگالی

آزمایش چگالی نمونه‌ها توسط روش ارشمیدس انجام شد. بیشترین چگالی واقعی² در میان نمونه‌های ریخته‌گری مربوط به نمونه C2 بوده و برابر $2/68 \text{ g/cm}^3$ است. تأثیر حضور ذرات TiB₂ بر افزایش چگالی نمونه C0 را می‌توان با استفاده از قانون مخلوط‌ها توجیه نمود؛ با افزایش 2٪ وزنی ذرات تقویت‌کننده TiB₂ به آلیاژ آلومینیوم 5083 به دلیل دانسیته بیشتر این ذرات ($4/52 \text{ g/cm}^3$) نسبت به آلیاژ زمینه ($2/66 \text{ g/cm}^3$)، چگالی کامپوزیت افزایش پیدا کرد. ولی استفاده از ذرات تقویت‌کننده TiB₂ بیش از 2٪ وزنی باعث کاهش سیالیت مذاب و افزایش حباب‌های محبوس شده در حین انجماد و در

میزان بهینه استفاده از ذرات تقویت‌کننده TiB₂، 4٪ وزنی است، که در مقادیر کمتر و یا بیشتر از آن، استحکام کششی نسبت به حالت بهینه کاهش پیدا کرد. با توجه به این نکته که آلیاژ آلومینیوم AA5083 از نوع آلیاژهای کار پذیر است، مسلماً انجام فرآیند تکمیلی باعث افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در خواص مکانیکی آن می‌شود [28]. به طوری که انجام فرآیند اکستروژن تأثیرات قابل‌ملاحظه‌ای بر استحکام کششی نمونه‌های تولید شده توسط این روش داشت و عیوب ناشی از فرآیند ریخته‌گری را کاهش داد. جدول 3 درصد افزایش استحکام کششی نمونه‌ها پس از انجام فرآیند اکستروژن را نشان می‌دهد. نمونه E6 به دلیل داشتن بیشترین مقادیر ذرات توده‌ای شده و تخلخل در میان سایر نمونه‌ها پس از انجام فرآیند اکستروژن بیشترین درصد افزایش استحکام کششی را داشت. دلیل اصلی آن می‌تواند کاهش مقادیر بیش‌تر این عیوب در نمونه E6 نسبت به سایر نمونه‌ها در حین فرآیند اکستروژن باشد.

جدول 3 درصد افزایش استحکام کششی نمونه‌ها پس از انجام فرآیند اکستروژن. Table 3 Percentage Increase in Tensile Strength of Samples After the Extrusion Process.

ردیف	نام نمونه	درصد افزایش استحکام کششی
1	E0	54
2	E2	71.8
3	E4	48
4	E6	73
5	E4*	54.6

3-8- بررسی اثر درصد وزنی تقویت‌کننده بر سختی

جدول 4 مقادیر سختی نمونه‌های به‌دست آمده از آزمایش سختی سنجی برینل را نشان داده است. بیشترین سختی در بین نمونه‌های ریخته‌گری مربوط به نمونه C 4 می‌باشد که برابر 83 BHN است. دلیل اصلی آن سختی بیشتر ذرات تقویت‌کننده TiB₂ نسبت به آلیاژ آلومینیوم 5083 است. بر این اساس، از آنجایی که سختی ذرات تقویت‌کننده TiB₂ از فاز زمینه بیشتر است، با افزایش این ذرات سختی نمونه کامپوزیتی افزایش پیدا کرد. همچنین افزایش سختی نمونه‌ها در اثر افزایش ذرات TiB₂ را می‌توان بر اساس دانسیته نابجایی‌ها توجیه نمود؛ افزایش ذرات TiB₂ باعث افزایش دانسیته نابجایی‌ها در حین انجماد نمونه (عدم انطباق انبساط حرارتی میان تقویت‌کننده و زمینه می‌تواند در هنگام انجماد باعث ایجاد تنش‌های داخلی در نمونه و افزایش چگالی نابجایی‌ها در زمینه شود)، کاهش فاصله لغزش حرکت نابجایی‌ها (از طریق مکانیزم قفل شدن نابجایی‌ها) و جلوگیری از رشد دانه (ذرات تقویت‌کننده در مرز دانه به‌عنوان مانعی در برابر رشد دانه عمل می‌کنند) و در نتیجه منجر به افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک و زیاد شدن سختی شوند. بنابراین می‌توان گفت که افزایش ذرات تقویت‌کننده باعث افزایش کار سختی در نمونه می‌شود. اما استفاده از ذرات تقویت‌کننده TiB₂ بیش حد از بهینه باعث افزایش توده‌ای شدن ذرات و به تبع ایجاد تخلخل در فصل مشترک ذرات و زمینه می‌گردد؛ از این رو نواحی مستعد به تمرکز تنش افزایش یافته و در نتیجه سختی نمونه کاهش پیدا کرده است. بنابراین در مورد سختی نمونه‌ها باید حد بهینه‌ای در نظر گرفت تا از سختی نمونه‌ها کاسته نشود [20 و 30].

² Experimental density

¹ dispersion strengthening

سطوح شکست کامپوزیت‌ها مشخصه‌های شکست نرم و ترد به‌طور هم‌زمان دیده شد. این نتایج، افزایش استحکام و سختی، و کاهش داکتیلیته نمونه‌ها را با افزایش ذرات تقویت‌کننده تأیید کرد. ذرات تقویت‌کننده TiB₂ به‌عنوان موانع مرز دانه باعث ریزدانه شدن ساختار زمینه و همچنین به‌عنوان موانعی در مسیر حرکت نابجایی‌ها مانع حرکت آسان آن‌ها شد که در نتیجه منجر به افزایش استحکام کششی و سختی، و کاهش داکتیلیته نمونه‌ها شد. همچنین انجام فرآیند اکستروژن به دلیل ایجاد اندازه دانه و ذرات تقویت‌کننده ریزتر، ذرات توده‌ای و حفره‌های کمتر در نمونه‌ها باعث افزایش استحکام کششی و سختی قطعات شده و در نتیجه منجر به ایجاد شکست تردتر شد. به همین دلیل سطوح شکست نمونه‌های E 2، E 4 و E 6 دارای حفره‌های سطحی کمتر و سطوح صاف و مسطح بیشتر نسبت به شکست نمونه‌های C 2، C 4 و C 6 است. بنابراین شکست نمونه‌های E 2، E 4 و E 6 نسبت به شکست نمونه‌های C 2، C 4 و C 6 تردتر است [18]. همچنین با مقایسه تصاویر سطوح شکست نمونه‌های ریخته‌گری (C 2، C 4 و C 6) و نمونه‌های اکستروژن شده (E 2، E 4 و E 6) توزیع نسبتاً غیریکنواختی از سطوح صاف و مسطح در نمونه‌های ریخته‌گری مشاهده شد که می‌توان این موضوع را با توزیع غیریکنواخت ذرات تقویت‌کننده در حالت ریخته‌گری را توجیه کرد.

3-13- بررسی خاصیت ترشوندگی

آلیاژ AA5083 یک آلیاژ آلومینیوم است که عمدتاً شامل منیزیم و مقادیر کمی از عناصر دیگر مانند منگنز و کروم است. حضور منیزیم می‌تواند تنش سطحی آلومینیوم مذاب را کاهش دهد، که منجر به بهبود ترشوندگی روی سطح TiB₂ می‌شود. اما اگر میزان منیزیم زیاد باشد، ممکن است باعث ایجاد فازهای میان‌فلزی در مرز دانه‌ها شود که بر خواص مکانیکی تأثیر منفی بگذارد. منگنز و کروم می‌توانند با منیزیم واکنش دهند و باعث تشکیل فازهای میان‌فلزی مانند Al₆(Mn,Cr) شوند. حضور این فازهای میان‌فلزی ممکن است موجب تضعیف ترشوندگی شود، زیرا فازهای میان‌فلزی معمولاً تمایل به جداسازی دارند و از توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده جلوگیری می‌کنند. فازهای میان‌فلزی که در نتیجه حضور عناصر آلیاژی و واکنش‌های بین آن‌ها و ذرات تقویت‌کننده تشکیل می‌شوند، به‌طور مستقیم بر روی ترشوندگی و خواص کامپوزیت تأثیر می‌گذارند. در این کامپوزیت، حضور TiB₂ به دلیل سازگاری شیمیایی و فیزیکی‌اش با آلومینیوم بهبود ترشوندگی را ممکن می‌سازد، اما وجود فازهای میان‌فلزی مانند Al₃Ti یا TiAl در اثر واکنش بین Ti و Al ممکن است باعث ایجاد نواحی سخت و ترد شود که ترشوندگی را کاهش داده و سبب تجمع این ذرات در برخی مناطق می‌شود. این موضوع باعث کاهش استحکام نهایی و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی می‌شود. به همین دلیل یکی از راه‌های بهبود ترشوندگی در این نوع کامپوزیت‌ها، کنترل دقیق دما و سرعت گردایی در فرآیند ریخته‌گری است. افزایش سرعت گردایی باعث توزیع یکنواخت‌تر ذرات TiB₂ در زمینه می‌شود و زمان تماس بین آلیاژ و تقویت‌کننده را افزایش می‌دهد که می‌تواند به افزایش ترشوندگی کمک کند [32].

4- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

1. در این پژوهش، کامپوزیت‌های AA5083/TiB₂ با 2/، 4/ و 6/ وزنی ذرات تقویت‌کننده TiB₂، به‌وسیله روش ترکیبی آسیاکاری مکانیکی پودرهای Al₂O₃ و B₂O₃ با واکنش درجا در مذاب AA5083 ساخته شدند.
2. در این پژوهش، کامپوزیت درجا AA5083/TiB₂، به‌وسیله روش ترکیبی آسیاکاری مکانیکی با واکنش درجا در مذاب، در دمای 750°C ساخته

نتیجه باعث افزایش تخلخل‌های گازی شد. همچنین افزایش ذرات TiB₂ بیش از 2٪ وزنی منجر به افزایش ذرات توده‌ای و به‌تبع ایجاد تخلخل در فصل مشترک بین این ذرات و فاز زمینه شد. براین‌اساس، با افزایش ذرات تقویت‌کننده به مقادیر 4/ و 6٪ وزنی چگالی کامپوزیت‌ها به‌ترتیب به 2.57g/cm³ و 2.49g/cm³ کاهش پیدا کرد.

3-11- اثر فرآیند اکستروژن بر تخلخل

با انجام فرآیند اکستروژن بر روی نمونه‌های ریخته‌گری به دلیل فشارهای اعمالی ناشی از این فرآیند میزان تخلخل قطعات کاهش و در نتیجه چگالی نسبی آن‌ها افزایش یافت. در حین فرآیند تغییر شکل گرم فاز آلومینیوم زمینه سیلان پیدا کرده و به اطراف ذرات و درون خلل و فرج‌های ناشی از محبوس شدن حباب‌های گازی وارد شد و در نتیجه تخلخل‌ها پر شدند. بیشترین چگالی به‌دست آمده متعلق به نمونه E⁴ بود و برابر 2.79 g/cm³ است. دلیل اصلی آن، کاهش دمای اکستروژن بود که باعث ریزتر شدن اندازه دانه‌ها و در نتیجه تشدید در کاهش فضاهای خالی و تخلخل‌های ناشی از فرآیند ریخته‌گری شد؛ در نتیجه چگالی نمونه افزایش یافت.

3-12- بررسی سطوح شکست

حفره‌های سطحی (دیمپل‌ها) یکی از عوامل اصلی به‌منظور تشخیص نوع شکست قطعات محسوب می‌شوند. هر چه اندازه، عمق و تعداد حفره‌های سطحی بیشتر باشد شکست قطعه نرم‌تر است. بنابراین می‌توان گفت که شکست ترد دارای حفره‌های سطحی کمتری نسبت به شکست نرم است. تصاویر SEM سطح شکست نمونه‌های C 0 (a) و E 0 (b) پس از آزمون کشش در شکل 15 نشان داده شده‌اند. با مقایسه سطوح شکست نمونه‌های C 0 و E 0 می‌توان دریافت که نحوه شکست قطعات با یکدیگر متفاوت است. نمونه C 0 دارای تعداد حفره‌های سطحی بیشتری نسبت به نمونه E 0 است. همچنین با توجه به سطوح شکست، سطوح شکست صاف و مسطح در نمونه E 0 به وضوح قابل مشاهده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نمونه C 0 شکستی کاملاً نرم و نمونه E 0 شکستی بین حالت نرم و ترد دارد. این نتایج، کاهش داکتیلیته نمونه E 0 در مقایسه با نمونه C 0 را تأیید کرد. دلیل اصلی آن، طبق قانون هال-پچ، ریزدانه شدن ساختار در حین فرآیند اکستروژن گرم است که در نتیجه باعث افزایش سختی، استحکام نمونه و ایجاد شکست تردتر شد [30].

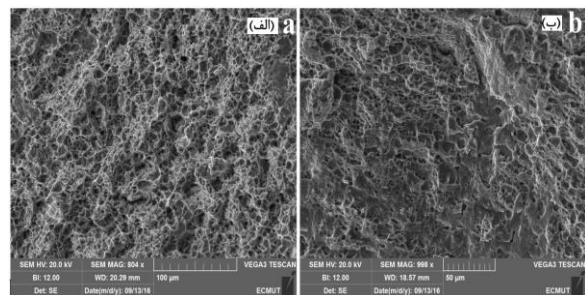


Fig. 15 Fracture Surfaces of Samples a) C0 and b) E0.

شکل 15 سطوح شکست نمونه‌های (الف) C 0 و (ب) E 0.

با بررسی سطوح شکست کامپوزیت‌های C 2، E 2، C 4، E 4 و C 6 و E 6 مشخص شد که با افزایش ذرات تقویت‌کننده TiB₂ و انجام فرآیند اکستروژن، حفره‌های سطحی کاهش و سطوح صاف و مسطح افزایش یافته و در نتیجه نوع شکست از شکست نرم به شکست نرم و ترد تبدیل شد. در

- enhancement in Mg-Li-Al matrix composites reinforced by ex situ TiB₂ particles via stir casting,” *Journal of Magnesium and Alloys*, Vol.1, doi.org/10.1016/j.jma.2022.09.020, 2022.
- [9] Kelu, S., Xizhou, K., Chengchao, D., Xu, G., Qiang, P., Tao, W., Yutao, Z., “Influence of ZrB₂ and Al₂O₃ nanoparticles on microstructure and mechanical property of friction stir welded joints of in-situ 7085Al matrix composites,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.326, doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118323, 2024.
- [10] Jahani, A., Jamshidi Aval, H., Ragabi, M., Jamaati, R., “Effect of extrusion speed on properties of Cu-5vol.%Ti₂SnC composite wire fabricated by friction stir back extrusion process,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol.34, No. 3, pp. 935-951, doi.org/10.1016/S1003-6326(23)66444-1, 2024.
- [11] Xudong, H., Hui, L., Wei, H., Gonglin, W., Xiaolong, Z., Xinyao, W., Shcheretskiy, V., Oleksandr, S., “Study on the microstructure and mechanical properties of hot rolled nano-ZrB₂/AA6016 aluminum matrix composites by friction stir processing,” *Materials Today Communications*, Vol.40, doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.109815, 2024.
- [12] Li, X., Das, H., Pole, M., Li, L., Soulam, A., Grant, G., R. Herling, D., Efe, M., “Exceptional strength and wear resistance in an AA7075/TiB₂ composite fabricated via friction consolidation,” *Materials & Design*, Vol.242, doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113006, 2024.
- [13] Sethi, D., Kumar, S., Choudhury, S., Shekhar, S., Saha Roy, B., “Synthesis and characterization of AA7075/TiB₂ aluminum matrix composite formed through stir casting method,” *Materials Today: Vol.26, No.2*, pp. 1908-1913, doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.418, 2020.
- [14] AmithKumar, G., Keshavamurthy, R., Ugrasen, G., Adarsh, H., “Investigation on Mechanical Behavior of Hot Rolled Al7075-TiB₂ In-situ Metal Matrix Composite,” *Materials Today: Proceedings*, Vol.5, No.11, pp. 25605-25614, doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.430, 2018.
- [15] Pazhouhanfar, Y., Eghbali, B., “Microstructural characterization and mechanical properties of TiB₂ reinforced Al6061 matrix composites produced using stir casting process,” *Materials Science and Engineering: A*, Vol.710, pp. 172-180, doi.org/10.1016/j.msea.2017.10.087, 2018.
- [16] Sharifian, B., Borhani, G.H., Sharifi, E.M., “Synthesis of Al7075/TiB₂-Al₂O₃ In-Situ Hybrid Composite by Stir Casting Method,” *Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal)*, Vol. 41, No.2, pp. 51-65, 2020.
- [17] Standard, ASTM E8m-09: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2009.
- [18] Cocen, U., Onel, K., “Ductility and strength of extruded SiC_p/Aluminum-Alloy composites,” *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 275-282, 2010.
- [19] Alizadeh, A., Taheri-nassaj, E., Hajizamani, M., “Hot extrusion process effect on mechanical behavior of stir cast Al based Composites reinforced with mechanically milled B4C nanoparticles,” *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 27, pp. 1113-1119, 2011.
- [20] Takahiro, A., Kaname, T., Tetsuhiko, O., “In-situ Synthesis of Al-based Composites Reinforced with TiB₂-TiC-Al₂O₃ Ceramic Particulates,” *Journal of Sustainable Research in Engineering*, Vol.2, No.2, pp. 45-52, 2015.
- [21] Zhong-Chun, C., Takenobu, T., Keisuke, T., “Microstructural evolution of reactive-sintered aluminum matrix composites,” *Composites Science and Technology*, Vol. 68, pp. 2245-2253, 2008.
- [22] Sajjadi, S. A., Ezatpour, H. R., Torabi Parizi, M., “Comparison of microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy/Al₂O₃ composites fabricated by stir and compo-casting processes,” *Materials and Design*, Vol.34, pp. 106-111, 2012.
- [23] Sattari, M. R., “Effect of particle volume fraction on tensile properties of composite Al6061/SiC materials by hot extrusion,” *composite part B*, Vol.18, No. 6, pp. 268-274, 2012.
- شد که در مقایسه با سایر روش‌های رایج سنتز درجا در مذاب، دمای پایین‌تری داشت.
3. با افزایش ذرات تقویت‌کننده TiB₂ به مقادیر 4٪ و 6٪ وزنی، تخلخل‌های ریخته‌گری افزایش یافت و چگالی نمونه‌های ریخته‌گری کاهش پیدا کرد. به طوری که نمونه ریخته‌گری AA5083/6%TiB₂ دارای کمترین چگالی 2.49 gr/cm³ در بین تمامی نمونه‌ها بود.
4. در ریزساختار نمونه‌های اکستروژن شده، اندازه دانه و ذرات تقویت‌کننده ریزتر بوده و ذرات توده‌ای و حفره‌های کمتری دیده شد. این ویژگی‌ها تأثیر بسزایی در افزایش خواص مکانیکی کامپوزیت‌های AA5083/TiB₂ داشت؛ به طوری که استحکام کششی نمونه‌ها را تا 73٪ افزایش داد.
5. در میان تمامی نمونه‌ها، نمونه E4* بیشترین استحکام کششی و سختی و کم‌ترین انعطاف‌پذیری را داشت. دلیل این موضوع چگالی بیش‌تر نابجایی‌ها نسبت به نمونه E4، ذرات توده‌ای کمتر نسبت به نمونه E6 و درصد ذرات تقویت‌کننده بیش‌تر نسبت به نمونه E2 است. استحکام کششی، درصد ازدیاد طول و سختی این کامپوزیت به ترتیب 470 MPa، 6.92٪ و BHN 114 بود.
6. با افزایش ذرات تقویت‌کننده TiB₂ و انجام فرآیند اکستروژن گرم نوع شکست نمونه‌ها از شکست نرم به سمت شکست ترد پیش رفت. سطح شکست نمونه‌های C0، C2، C4 و C6 نشان‌دهنده مشخصه‌های شکست نرم‌تر در مقایسه با نمونه‌های E0، E2، E4 و E6 است. نرم‌ترین شکست مربوط به نمونه C0 و تردترین شکست متعلق به نمونه E6 بود.
7. منیزیم در آلیاژ AA5083 با کاهش تنش سطحی، ترشوندگی روی ذرات TiB₂ را بهبود می‌بخشد. فازهای میان‌فلزی می‌توانند ترشوندگی را تضعیف کرده و باعث تجمع ذرات در برخی نواحی شوند که خواص مکانیکی کامپوزیت را کاهش می‌دهد. اما کنترل دما و سرعت گردایی در فرآیند ریخته‌گری گردایی باعث بهبود ترشوندگی و توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده در زمینه می‌شود.

مراجع

- [1] Hashemi, M., “Investigation of the Impact of Surface Oxidation Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-SiC Composites,” *Malek Ashtar University of Technology*, 2008.
- [2] Akao, T., Tonoko, K., Onda, T. and Chen, Z., “In-situ Synthesis of Al-based Composites Reinforced with TiB₂-TiC-Al₂O₃ Ceramic Particulates,” *Journal of Sustainable Research in Engineering* Vol.2, No.2, pp. 45-52, 2015.
- [3] Koczak, P., “Mechanical Behavior of powder Metallurgy Al-Fe-Ni alloys,” *Materials Science and Engineering*, Vol.14, No.2, pp. 127-139, 1994.
- [4] Chawla, N., Chawla, K., “Metal Matrix Composite, Springer Science,” Vol.14, No.6, pp. 48-75, 2006.
- [5] Hashim, J., Looney, L., and Hashmi, M. S. J., “Metal matrix composites: production by the stir casting method,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 92, pp. 1-7, 1999.
- [6] Mazaherya, A., Abdizadeha, H., Baharvandi, H.R., “Development of high-performance 356/nano-Al₂O₃ composites,” *Materials Science and Engineering A*, Vol. 518, pp. 61-64, 2009.
- [7] Sivasankaran, S., Irfan, O. M., Ramkumar, K.R., Ammar, H.R.A. Al-Mufadi, F., Alaboodi, A. S., Seop Kim, H., “Manufacturing of (Al-10Zn) / TiB₂ in-situ nanocomposites by reactive liquid metallurgy and hot-extrusion for enhanced interfacial bonding and mechanical properties,” *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 859, doi.org/10.1016/j.msea.2022.144200, 2022.
- [8] Jiawei, S., Dehua, D., Wencai, L., Guohua, W., Hongjie, L., Guangling, W., Hezhou, L., “Strength and elastic modulus

- [24] Lloyd, D.J., "Particle Reinforced Aluminum and Magnesium Matrix Composites," International Materials Reviews, Vol.39, pp. 175-187, 1986.
- [25] Dieter, G.E., "Mechanical Metallurgy," Tehran, Academic Publishing Center, First Edition, 2003.
- [26] Khakwani, S.M., "Analysis of Dispersion Techniques of Boron Carbide Nanoparticles in AA-6061 Matrix Using Powder Metallurgy Approach," A Thesis for the Degree of Master of Science, Lehigh University, 2009.
- [27] Laue, K., Stenger, H., "Extrusion Processes," Second Edition, Machinery and Tooling, 1976.
- [28] Khakwani, S.M., "Analysis of Dispersion Techniques of Boron Carbide Nanoparticles in AA-6061 Matrix Using Powder Metallurgy Approach," A Thesis for the Degree of Master of Science, Lehigh University, 2009.
- [29] Mazaherya, A., Abdizadeha, H., Baharvandi, H.R., "Development of high-performance 356/nano-Al₂O₃ composites," Materials, Science and Engineering A, Vol.518, pp. 61-64, 2009.
- [30] Tham, L. M., Gupta, M., Cheng, L., "Effect of reinforcement volume fraction on the evolution of reinforcement size during the extrusion of Al-SiC Composite," Material Science and Engineering A, Vol.326, pp. 355-363, 2010.
- [31] Zafari, A., Kashani-Bozorg, S. F., Zarei-Hanzaki, A. "Microstructure and mechanical properties of TiB₂-reinforced aluminum matrix composite produced by friction stir processing," Materials & Design, Vol.40, pp:157-166, 2012.
- [32] Prasad, D. S., Krishna, A. R. "Production and mechanical properties of A356.2/TiB₂ composites with in-situ and ex-situ processes," Materials Science and Engineering: A, Vol.528, No.12, pp.3985-3996, 2011.