



مقاله کامل پژوهشی

بررسی ریزساختار و خواص کششی نانوکامپوزیت های Al5083-TiB_2 تولیدشده به روش ریخته گری گردابی

علی علیزاده^{۱*}، مهدی عبدللهی آذغان^۲

^۱ استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

^۲ دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۳۹۹/۰۷/۲۸

دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۹/۰۹/۱۰

پذیرش قطعی: ۱۴۰۰/۰۶/۲۸

کلیدواژه ها:

آلومینیوم ۵۰۸۳

دی بورید تیتانیم

ریخته گری گردابی

اکستروژن گرم

چکیده در پژوهش حاضر، تأثیر افزودن نانوذرات دی بورید تیتانیم (TiB_2) بر ریزساختار و خواص کششی کامپوزیت زمینه آلومینیوم ۵۰۸۳ مطالعه و بررسی شد. کامپوزیت های Al5083-TiB_2 (با ۵ و ۱۰ درصد وزنی تقویت کننده)، همراه با افزودنی های زیرکونیم (Zr) و اکسید سربیم (CeO_2)، با درصد های مختلف وزنی و به روش ریخته گری گردابی، در دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس، تحت فرایند درجا تولید شدند. سپس نمونه ها، به منظور توزیع یکنواخت تقویت کننده ها در زمینه، تحت فرایند اکستروژن گرم قرار گرفتند. نانوذرات TiB_2 مورد استفاده در این پژوهش، با روش درجا، به وسیله پیش ماده های کریولیت (Na_3AlF_6)، اکسید تیتانیم (TiO_2) و پتاسیم تترافلورو بوراید (KBF_4)، در مذاب آلومینیوم فراوری شد. به منظور بررسی ریزساختار، سطوح و سازوکار شکست نمونه ها، از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ نوری (OM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. نتایج آزمون کشش نشان داد که افزودن ۱۰ درصد وزنی ذرات TiB_2 ، در مقایسه با نمونه بدون تقویت کننده، باعث افزایش ۱۷/۷ درصدی استحکام کششی نهایی و کاهش ۱۹/۲ درصدی کرنش می شود. همچنین، افزودن Zr و CeO_2 ، به علت حذف ترکیب بین فلزی Al_3Ti و سازوکار عدم تطابق (ضرایب) انبساط حرارتی با زمینه، در مقایسه با نمونه بدون تقویت کننده، باعث افزایش ۳۵/۸ درصد استحکام و ۷۸ درصد کرنش نمونه حاوی ۱۰ درصد تقویت کننده شد. همچنین، آنیل کردن، بعد از مرحله اکستروژن، در نمونه حاوی ۱۰ درصد وزنی TiB_2 ، باعث کاهش استحکام کششی شد.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.251930.1131>

URL: https://www.jamt.ir/article_126412.html

Original Research Article

Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT): Vol. 10, No. 2, (Summer 2021), 45-57

Investigation on the Microstructure and Tensile Properties of Al5083-TiB_2 Nanocomposites Produced by Stir Casting Method

Ali Alizadeh^{1*}, Mehdi Abdollahi Azghan²

¹ Assistant Professor, University Complex of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology (MUT), Tehran, Tehran, Iran

*عهده دار مکاتبات

نشانی: ایران، تهران، تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، تلفن: ۰۲۱-۲۲۹۸۶۵۷۵، دورنگار: -

پیام نگار: a_alizadeh@mut.ac.ir

Please cite this article as: Alizadeh, A., Abdollahi Azghan, M., "Investigation on the microstructure and tensile properties of Al5083-TiB_2 nanocomposites produced by stir casting method", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 10, No. 2, (2021), 45-57. (<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.251930.1131>).

2783-0829/© 2021 The Author(s). Published by MERC.

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



² Ph. D. Student, University Complex of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology (MUT), Tehran, Tehran, Iran

Paper History:

Received: 2020-10-19
Revised in revised form: 2020-11-30
Accepted: 2021-09-19

Keywords:

Al5083 Alloy,
Titanium Diboride,
Stir Casting,
Hot Extrusion

Abstract

This study was conducted to investigate the effect of adding titanium diboride (TiB₂) nanoparticles on the microstructure and tensile properties of the Al5083 matrix composite. Al5083/TiB₂ metal matrix composites (with 5 and 10 wt % reinforcement) along with zirconium (Zr) and cerium oxide (CeO₂) additives with different wt % were fabricated by in situ-stir casting at 1000 °C. The samples were then subjected to hot extrusion for uniform distribution of reinforcements in the matrix. TiB₂ nanoparticles were in-situ processed in molten aluminum using the precursors such as cryolite (Na₃AlF₆), titanium oxide (TiO₂), and potassium tetrafluoroborate (KBF₄). The microstructure, surfaces, and failure mechanism of the samples were investigated using X-ray diffraction (XRD), optical microscopy (OM), and scanning electron microscopy (SEM). Tensile test results showed that the addition of 10 wt % TiB₂ particles increased the ultimate tensile strength by 17.7 % and decreased the strain by 19.2 % compared to the sample without reinforcement. Besides, the addition of Zr and CeO₂ increased the strength by 35.8 % and the strain of the sample containing 78 % by 10 % reinforcement compared to the sample without reinforcement due to the removal of intermetallic compound Al₃Ti and the incompatibility between coefficients of thermal expansion (CTE) with the matrix. Also, post-extrusion annealing in the sample with 10 wt % TiB₂ reduced the tensile strength.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.251930.1131>

URL: https://www.jamt.ir/article_126412.html

۱- مقدمه

چقرمگی^۱ بالای زمینه‌های فلزی، از یک سو و استحکام و مقاومت به سایش عالی تقویت‌کننده‌های سرامیکی، از سوی دیگر، باعث تولید کامپوزیت زمینه‌فلزی^۲ (MMC) شده که در بسیاری از صنایع، مانند هوافضا، خودروسازی و صنایع نظامی، مورد توجه قرار گرفته است. این کامپوزیت‌ها در سالهای اخیر، در ساخت بسیاری از قطعات خودرو، مانند پیستون ترمز، خطوط سیلندر و دیسک ترمز استفاده شده‌اند. اما به علت قیمت بالای فرایند تولید این نوع کامپوزیت‌ها، استفاده از آن‌ها، بیشتر به صنایع نظامی و هوافضا محدود شده است [۱].

آلومینیوم‌های آلیاژی، در مقایسه با سایر آلیاژهای فلزی، خواص مکانیکی خوبی، از قبیل چقرمگی شکست بالا، استحکام خوب و قیمت پایین از خود نشان می‌دهند که موجب شده بیشتر از سایر آلیاژهای مورد استفاده در انواع MMC، به کار گرفته شوند [۲].

کامپوزیت‌های زمینه‌فلزی، بیشتر حاوی تقویت‌کننده‌های غیرفلزی هستند که در حالت کلی، به دو دسته تقویت‌کننده‌های پیوسته (الیاف بلند و صفحه‌ای)، شامل گرافیت، بور و آلومینا (Al₂O₃) و تقویت‌کننده‌های ناپیوسته (الیاف کوتاه و ذرات)، شامل سیلیسیم کاربید (SiC)، Al₂O₃، دی‌بوراید تیتانیم (TiB₂) و کاربید بور (B₄C)، تقسیم می‌شوند. گزینه‌ای بسیار مناسب برای مواد تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های زمینه‌آلومینیومی است.

سختی و دمای ذوب بالای TiB₂، از پیوند قوی بین

اتم‌های تیتانیم و بور ناشی می‌شود. سختی این ماده، حدود ۲۵۰۰ ویکرز است که در کاربردهای با مقاومت به سایش بالا، به عنوان تقویت‌کننده استفاده می‌شود. استحکام بالای TiB₂ باعث شده است، در مواقع نیاز به استحکام بسیار بالا و وزن پایین، کامپوزیت‌های آلومینیومی تقویت‌شده با TiB₂، به عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها مطرح باشند. علاوه بر این، دمای کاری این ماده در اتمسفر محیط، حدود ۱۵۰۰ درجه سلسیوس است و در مقابل اکسایش، مقاومت بالایی دارد. همچنین، مقاومت TiB₂ در مقابل خوردگی و واکنش‌های شیمیایی نیز بسیار بالاست. البته، در تماس با مواد قلیایی بسیار قوی، مانند اسید نیتریک و اسید سولفوریک، وارد واکنش می‌شود [۳].

انواع MMC، به دو روش اصلی، حالت جامد و حالت مایع، تولید می‌شوند. روش حالت مایع، در مقایسه با فرایندهای حالت جامد، مانند اکستروژن یا اتصال‌دهی نفوذی، دارای مزایای فراوانی، از جمله مقرون به صرفه بودن فرایند، سهولت و سرعت بالای تولید است. در روش ریخته‌گری گردابی، هزینه‌های تولید کامپوزیت‌های زمینه‌فلزی، در مقایسه با سایر روش‌های تولید کامپوزیت‌های زمینه‌فلزی، حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد کمتر است [۴] و از مهم‌ترین ویژگی‌های آن می‌توان به محدودیت‌نداشتن آن در تولید قطعات بزرگ و پیچیده اشاره کرد. با این حال، توزیع غیریکنواخت ذرات تقویت‌کننده، کلوخه شدن^۳ ذرات و وجود تخلخل زیاد، از جمله معایب این روش هستند. البته، می‌توان از روش‌های فراوری ثانویه، مانند اکستروژن^۴، استفاده کرد. این روش، با خرد شدن کلوخه‌های

³ Agglomerate

⁴ Extrusion

¹ Toughness

² Metal Matrix Composites (MMC)

شده است که افزودن منیزیم به مذاب آلومینیوم، ترشوندگی TiB_2 را افزایش می‌دهد. درحقیقت، افزودن منیزیم به آلومینیوم، با بیشتر تقویت‌کننده‌ها، همخوانی دارد.

ترشوندگی خوب بین فاز سرامیکی جامد و زمینه فلزی مایع، شرط لازم برای برقراری پیوند مطلوب بین این دو، حین ریخته‌گری است [۱۰]. اصولی که بر طبق آن، ترشوندگی بهبود می‌یابد بر پایه افزایش انرژی سطحی جامد، کاهش کشش سطحی آلیاژ مایع یا کاهش انرژی فصل مشترک جامد - مایع در فصل مشترک ذره و زمینه، استوار است. از بین روش‌های بهبود ترشوندگی می‌توان به افزودن عناصر آلیاژی فعال (مانند منیزیم، زیرکونیم و تیتانیم)، اکسایش ذرات تقویت‌کننده، پوشش‌دهی ذرات (به روش آبکاری، رسوب شیمیایی بخار)، ایجاد محیط خلأ در زمان اختلاط دو فاز زمینه و تقویت‌کننده و مخلوط کردن فاز زمینه و تقویت‌کننده به کمک ابزارهای مکانیکی اشاره کرد [۱۱]. اخلاقی و همکاران [۱۲]، به این نتیجه رسیدند که با افزودن ۳ درصد وزنی لانتانیم به کامپوزیت درجای Mg_2Si ۱۵ % Al، اندازه متوسط ذرات اولیه MgS_2 از ۱۷ به ۱۰ میکرون، کاهش و استحکام کششی، از ۲۱۷ به ۲۲۳ مگاپاسکال، افزایش می‌یابد.

عالمی اردکانی و همکاران [۱۳]، خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت $Al-Mn+Al_2O_3$ ساخته‌شده به روش درجا را از طریق ریخته‌گری گردابی، مطالعه کردند. آن‌ها از پیش‌ماده‌های Al و MnO_2 (با نسبت وزنی $\frac{MnO_2}{Al} = 7$)، به‌منظور تولید فاز تقویت‌کننده، به روش درجا و از ۵ درصد وزنی منیزیم، برای افزایش ترشوندگی بین ذرات تقویت‌کننده و زمینه، استفاده کردند. آن‌ها مشاهده کردند افزایش پودر تزریقی MnO_2 از ۱ تا ۷ درصد وزنی، ابتدا باعث افزایش خواص مکانیکی (استحکام خمشی، چقرمگی و سختی) و سپس کاهش آن می‌شود و مقدار بهینه MnO_2 ، ۳ درصد وزنی بود. همچنین دریافتند با افزایش مقدار MnO_2 ، میزان چگالی نسبی، کاهش و درصد تخلخل نمونه، افزایش می‌یابد.

علی‌پور و همکاران [۱۴]، ریزساختار و سختی نانوکامپوزیت زمینه $Al7068$ تقویت‌شده با نانوذرات SiC را که به روش ریخته‌گری گردابی ساخته شده بود مطالعه کردند. مطالعات ریزساختاری آن‌ها نشان داد که حضور نانوذرات SiC ، باعث کاهش اندازه دانه می‌شود؛ اما در درصد‌های بالای

مواد تقویت‌کننده، توزیع یکنواخت ذرات و کاهش چگالی تخلخل‌ها همراه است. به‌طور کلی، اکستروژن برای تولید میله‌های استوانه‌ای یا لوله‌های توخالی به‌کار می‌رود، ولی مقاطعی با شکل نامنظم را می‌توان از فلزاتی که آسان‌تر اکستروود می‌شوند، مثل بیشتر آلیاژهای غیرآهنی (آلومینیوم و منیزیم)، تولید کرد [۵].

وجود افزودنی‌های دیگر در MMC، به‌جز زمینه و تقویت‌کننده، باعث بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی می‌شود. برای مثال، افزودن منیزیم به‌عنوان عنصر فعال، باعث افزایش ترشوندگی TiB_2 توسط زمینه آلومینیومی می‌شود. در پژوهش‌های جداگانه ژو [۶]، لی و همکارانشان [۷]، تأثیر افزودن اکسید سریم (CeO_2) و Zr بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت $Al-TiB_2$ مطالعه شد. آن‌ها مشاهده کردند افزودن CeO_2 و Zr از تجمع نانوذرات TiB_2 ، جلوگیری می‌کند و باعث توزیع یکسان آن در زمینه می‌شود که در نتیجه، افزایش خواص کششی را به‌دنبال دارد [۱ و ۲]. افزودن Zr و CeO_2 به کامپوزیت $Al5083-TiB_2$ ، با استفاده از چند سازوکار مختلف، موجب بهبود خواص کششی نمونه‌های کامپوزیتی می‌شود. حضور Zr به‌منزله اولین عامل، باعث حل ترکیب بین‌فلزی Al_3Ti و تبدیل آن به TiB_2 می‌شود [۸]. دومین سازوکار، تشکیل فاز Al_3Zr در زمینه است که مانند سدی در برابر حرکت نابجایی‌ها عمل می‌کند و در نتیجه، کارسختی و افزایش استحکام کششی نهایی را به‌دنبال دارد. سومین سازوکار، عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی بین زمینه، تقویت‌کننده و افزودنی‌هاست که تفاوت در ضریب انبساط حرارتی بین زمینه و CeO_2 ، تأثیر بسزایی در سازوکار استحکام‌دهی دارد [۹].

هنگامی که عناصر فعالی مانند منیزیم، کلسیم، تیتانیم یا زیرکونیم، با هدف افزایش ترشوندگی، به مذاب اضافه می‌شوند، در اثر کاهش کشش سطحی مذاب، کاهش انرژی فصل مشترک جامد - مایع در مذاب یا به‌وسیله واکنش شیمیایی، ترشوندگی افزایش می‌یابد. مشخص شده است که در کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی، منیزیم، در مقایسه با سایر عناصری نظیر سدیم، لانتانیم، زیرکونیم و تیتانیم، بیسموت، سرب، روی و مس، تأثیر بیشتری در دربرگیری ذرات تقویت‌کننده در مذاب و توزیع آن‌ها دارد. همچنین، آشکار

نانوذرات SiC (۵ درصد وزنی)، کاهش محسوسی در اندازه دانه ایجاد نمی‌شود. همچنین، حضور نانوذرات و کاهش اندازه دانه، سختی نانوکامپوزیت را به شدت افزایش داد. البته، در درصد‌های بالای نانوذرات SiC (۵ درصد وزنی)، این ذرات در مرزخانه‌ها کلوخه و باعث کاهش سختی کامپوزیت شد.

هدایتان و همکاران [۱۵]، تأثیر افزودن نانوصفحات اکسید گرافن بر خواص بالستیکی و جذب انرژی کامپوزیت زمینه Al6061 تولیدشده به روش ریخته‌گری گردابی و عملیات ثانویه نورد گرم را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با افزودن نانوصفحات اکسید گرافن، سرعت حد بالستیک نمونه‌های کامپوزیتی، در مقایسه با آلیاژ پایه، تا ۲۴ درصد بهبود می‌یابد. همچنین، میزان جذب انرژی نمونه‌های کامپوزیتی در بارگذاری شبه‌استاتیکی و ضربه‌ای، به ترتیب، ۱۱۶ و ۱۰۷ درصد، در مقایسه با آلیاژ Al6061، افزایش داشت. این مشاهدات، تأثیر بسیار خوب نانوصفحات اکسید گرافن بر جذب انرژی آلیاژ آلومینیومی را نشان داد.

فنج و همکاران [۱۶]، تأثیر افزودن عناصر مختلف بر توزیع ذرات TiB_2 (که با استفاده از واکنش نمک‌های K_2TiF_6 و KBF_4 تشکیل شد) را بررسی کردند. آنان دریافتند که افزودن Si، علاوه بر افزایش گرانروی یا ویسکوزیته^۱ مذاب، توزیع ذرات TiB_2 را نیز بهبود می‌بخشد. همچنین افزودن عنصر Sb به کامپوزیت Al-TiB₂ باعث کاهش کلوخه‌های TiB_2 و ریزدانه شدن ساختار می‌شود.

ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با TiB_2 موجب تشکیل ترکیب بین‌فلزی Al_3Ti می‌شود که کاهش شدید خواص مکانیکی کامپوزیت را در پی دارد. وانگ و همکاران [۱۷] خواص مکانیکی کامپوزیت زمینه Al356 تقویت‌شده با TiB_2 را بررسی کردند. در نتایج به دست آمده از XRD، اثری از ترکیب بین‌فلزی Al_3Ti دیده نشد. 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)، داشتند. همچنین دریافتند که افزودن نانوذرات TiB_2 ، تا ۸ درصد، در زمینه‌فلز باعث افزایش ۱۷ درصدی مدول و ۹ درصدی

استحکام کششی، در مقایسه با نمونه بدون نانوذرات، می‌شود. در پژوهش حاضر، تأثیر ۵ و ۱۰ درصد وزنی نانوذرات TiB_2 و افزودنی‌های Zr و CeO_2 بر ریزساختار و خواص کششی کامپوزیت زمینه آلومینیوم ۵۰۸۳ (Al5083) مطالعه شد. تاکنون پژوهش‌های بسیار کمی در خصوص تأثیر ذرات TiB_2 بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم انجام شده است. مزیت پژوهش حاضر، در مقایسه با پژوهش‌های پیشین، تعیین خواص فیزیکی قبل و بعد از فرایند ثانویه اکستروژن گرم است. همچنین تأثیر عناصر افزودنی در روش توزیع و شکل‌گیری نانوذرات تقویت‌کننده TiB_2 و تأثیر آن بر خواص مکانیکی نیز مطالعه شد. علاوه بر این، شناسایی سازوکارهای تأثیرگذار در رفتار کششی کامپوزیت‌های Al5083 تقویت‌شده با TiB_2 ، یکی دیگر از مزیت‌های پژوهش حاضر است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد

در پژوهش حاضر، آلیاژ Al5083، به دلیل خواص مناسب مانند استحکام کششی و چقرمگی بالا، شکل‌پذیری مناسب و مقاومت به خوردگی عالی [۱۸]، به عنوان زمینه کامپوزیت، انتخاب شد. به منظور تولید ذرات TiB_2 ، از پیش‌ماده‌های سدیم هگزا فلورو آلومینات (Na_3AlF_6)، دی‌اکسید تیتانیم (TiO_2) (خریداری شده از Sachtleben، آلمان) و پتاسیم تترافلورو بورات (KBF_4) (خریداری شده از Sigma-Aldrich، آمریکا) استفاده شد. همچنین از افزودنی‌های CeO_2 (خریداری شده از Sigma-Aldrich، آمریکا) و زیرکونیم (Zr) استفاده شد.

۲-۲- ساخت نمونه‌ها

برای دستیابی به مخلوط یکنواخت از پودرهای Na_3AlF_6 ، TiO_2 و KBF_4 ، با نسبت استوکیومتری ۱:۱:۲ و افزودنی‌های CeO_2 و Zr با درصد‌های مختلف، از آسیاب گلوله‌ای، با سرعت ۸۰ دور در دقیقه، درون محفظه پلیمری استفاده شد. سپس، پودر حاصل، به مذاب فاز زمینه در دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس اضافه شد. به منظور توزیع یکسان پودر، مذاب به مدت ۱۰ دقیقه، توسط همزن مکانیکی مخلوط و

¹ Viscosity

اکستروژن، آماده‌سازی سطحی شدند.

شناسایی تقویت‌کننده‌ها در MMC، به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی^۲ (FE-SEM) مدل MIRA3TESCAN انجام شد. همچنین، به‌منظور بررسی تغییرات ریزساختاری و توزیع ذرات تقویت‌کننده نمونه‌ها، میکروسکوپ الکترونی روبشی^۳ (SEM) مدل XL30 شرکت ست‌اسکن هلند استفاده شد.

در این پژوهش، به‌منظور شناسایی فاز تقویت‌کننده، از دستگاه پراش پرتو ایکس^۴ (XRD) ساخت شرکت فیلیپس مدل D6792 کشور هلند استفاده شد. نمونه‌ها، در مرحله آماده‌سازی نمونه، برای تشخیص فازهای تشکیل‌شده در حین فرایند درجا، در هیدروکلریک اسید^۵ قرار داده شدند تا پس از حذف A15083، فازهای تشکیل‌شده، آنالیز شوند.

۲-۴- اندازه‌گیری چگالی

به‌منظور تعیین چگالی کامپوزیت‌های تولیدشده پس از فرایند ریخته‌گری و اکستروژن، از دستگاه میتلر^۶ کشور سوئیس استفاده شد.

۲-۵- محاسبه تخلخل

به‌منظور اندازه‌گیری میزان تخلخل در نمونه‌های ریخته‌گری‌شده و همچنین اثر افزوده شدن ذرات تقویت‌کننده بر چگالی نمونه‌ها، از دو روش سنجش چگالی تئوری و چگالی ارشمیدسی که در روابط (۱) و (۲) آمده است، استفاده شد.

$$\rho_{th} = X_{reinf} \times \rho_{reinf} + X_M \times \rho_M \quad (1)$$

$$\% \text{ Porosity} = (\rho_{th} - \rho_a) / \rho_{th} \times 100 \quad (2)$$

در رابطه (۱) و (۲)، ρ_M ، چگالی زمینه، ρ_{reinf} ، چگالی تقویت‌کننده، X_M ، کسر حجمی زمینه، X_{reinf} ، کسر حجمی تقویت‌کننده، ρ_{th} ، چگالی تئوری و ρ_a ، چگالی اندازه‌گیری‌شده به روش ارشمیدسی است.

به‌مدت ۴۰ دقیقه، برای انجام واکنش پیش‌ماده‌ها، در دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس، نگهداری شد [۱۹ و ۲۰]. به‌منظور جلوگیری از تشکیل اکسید آلومینیوم، در تمامی مراحل فرایند تولید اعم از ذوب و ریخته‌گری، از گاز آرگون استفاده شد.

نمونه‌های ریخته‌گری، به طول تقریبی ۴۵ میلی‌متر، بریده شد و تحت عملیات اکستروژن گرم، در یک قالب اکستروژن با نسبت ۱:۹ از فولاد ابزار گرم‌کار W360 ساخته‌شده توسط شرکت بوهرلر، با دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفت که با اعمال فشار ۷۰۰ بار، طول نمونه به حدود ۲۷۰ میلی‌متر رسید. به‌منظور جلوگیری از اصطکاک بین قالب و نمونه کامپوزیتی، از روان‌ساز گرافیتی مولیکوت (خریداری‌شده از شرکت داوکورنینگ - مولیکوت کشور آلمان) استفاده شد. در جدول ۱، کد نمونه، نوع عملیات، درصد وزنی تقویت‌کننده و سایر افزودنی‌های کامپوزیت‌های تهیه‌شده، فهرست شده است.

جدول ۱. کد نمونه، عملیات و درصد وزنی افزودنی‌ها

کد نمونه	عملیات	درصد وزنی افزودنی‌ها		
		CeO ₂	Zr	TiB ₂
T0-C	ریخته‌گری	۰	۰	۰
T0-E	اکستروژن	۰	۰	۰
T1-C	ریخته‌گری	۰	۰	۵
T1-E	اکستروژن	۰	۰	۵
T2-C	ریخته‌گری	۰/۲۵	۰/۲۵	۵
T2-E	اکستروژن	۰/۲۵	۰/۲۵	۵
T3-C	ریخته‌گری	۱	۱	۵
T3-E	اکستروژن	۱	۱	۵
T4-C	ریخته‌گری	۰	۰	۱۰
T4-E	اکستروژن	۰	۰	۱۰
T5-C	ریخته‌گری	۰/۵	۰/۲۵	۱۰
T5-E	اکستروژن	۰/۵	۰/۲۵	۱۰
T6-E	اکستروژن - آنیل	۰/۵	۰/۲۵	۱۰

۲-۳- بررسی میکروسکوپی و مشخصه‌یابی نمونه‌ها

به‌منظور بررسی تغییرات ریزساختاری کامپوزیت‌ها، از میکروسکوپ نوری اولایمپوس^۱ مجهز به دوربین دیجیتال BX61 استفاده شد. نمونه‌های تولیدشده قبل و بعد از فرایند

^۲ Field Emission-Scanning Electron Microscope (FE-SEM)

^۳ Scanning Electron Microscope (SEM)

^۴ X-Ray Diffraction (XRD)

^۵ Hydrochloric Acid (HCl)

^۶ Mettler

^۱ Olympus

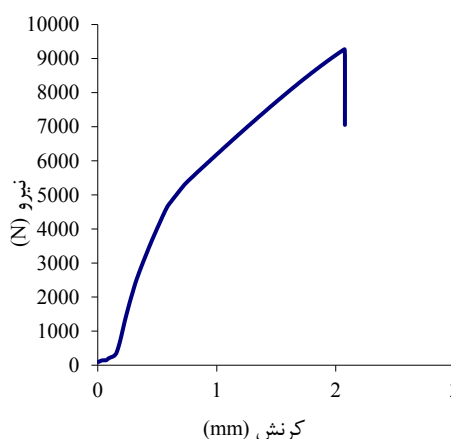
۲-۶- آزمون کششی

می‌شود، اما کاملاً از بین نمی‌رود. در نمونه حاوی ۱۰ درصد وزنی TiB_2 نیز میزان تخلخل بعد از مرحله اکستروژن، در مقایسه با مرحله ریخته‌گری، کاهش می‌یابد، ولی کامل حذف نمی‌شود (شکل ۳).

جدول ۲. تخلخل و چگالی کامپوزیت‌ها

کد نمونه	تخلخل (%)	چگالی (گرم بر سانتی‌مترمکعب)
T0-C	۰/۵۵	۲/۵۵
T0-E	۰/۳۷	۲/۶
T1-C	۰/۴۳	۲/۶۷
T1-E	۰/۳۵	۲/۶۹
T2-C	۰/۳۲	۲/۷۰
T2-E	۰/۲۵	۲/۷۲
T3-C	۰/۳۹	۲/۶۸
T3-E	۰/۳۵	۲/۶۹
T4-C	۱/۱۰	۲/۵۶
T4-E	۱/۰۰	۲/۵۹
T5-C	۱/۰۴	۲/۵۸
T5-E	۰/۸۶	۲/۶۳

برای تعیین خواص کششی نمونه‌های کامپوزیتی، از دستگاه کشش ساخت شرکت ایرانی سنتام^۱ مدل STM-50 و استاندارد ASTM E8M [۲۱] استفاده شد. حداقل تکرار انجام آزمون کشش برای هر گروه از نمونه‌ها، سه بار بود که داده‌های گزارش شده، میانگین آزمون‌های انجام شده را نشان می‌دهد. شکل ۱، نمودار نیرو - جابه‌جایی حاصل از آزمون کشش را برای نمونه T0-E نشان می‌دهد.

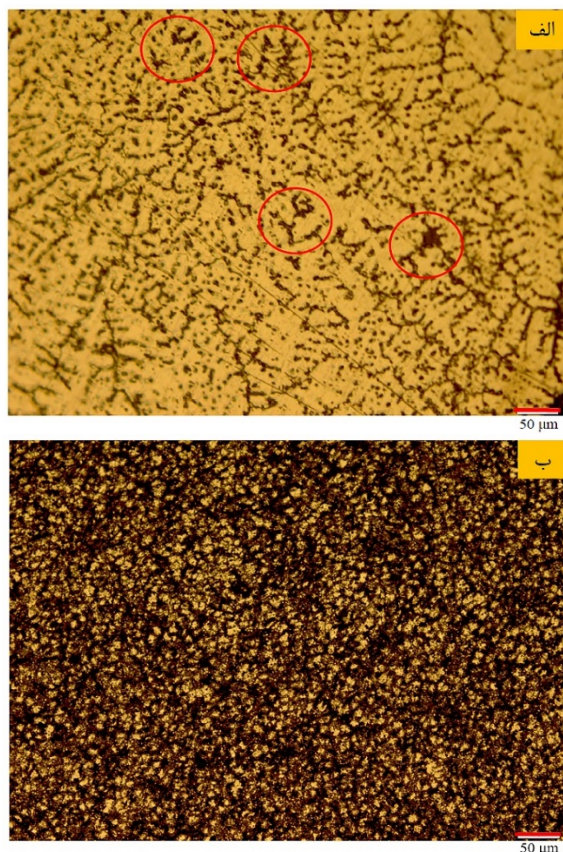


شکل ۱. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه T0-E

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تخلخل و چگالی کامپوزیت‌ها

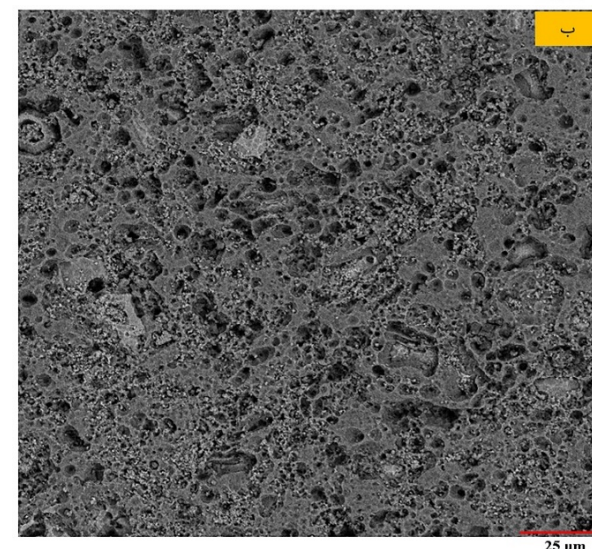
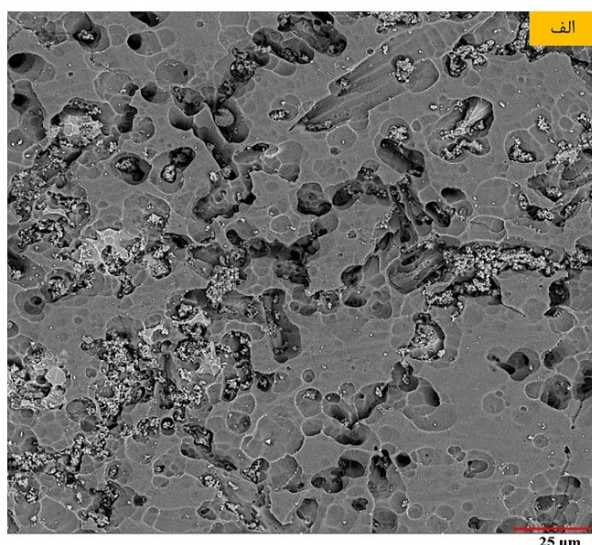
جدول ۲، تخلخل و چگالی کامپوزیت‌ها را قبل و بعد از اکستروژن، نشان می‌دهد. در تمامی نمونه‌های بعد از مرحله اکستروژن، میزان تخلخل، در مقایسه با مرحله قبل (ریخته‌گری)، کاهش یافته است. به عنوان مثال، در نمونه فاقد تقویت کننده و افزودنی، میزان تخلخل، در مرحله اکستروژن، ۰/۳۷ درصد است که در مقایسه با نمونه ریخته‌گری، ۰/۱۸ درصد کاهش یافته است. شکل ۲، میزان تخلخل در نمونه‌های T0-C و T0-E را نشان می‌دهد. در نمونه ریخته‌گری شده T0-C، وجود تخلخل، به وضوح قابل رؤیت است که در برخی مناطق (دایره‌های قرمز)، میزان این تخلخل بیشتر بوده و یکسان توزیع نشده است. ولی همان‌طور که در شکل ۲-ب مشاهده می‌شود، با انجام فرایند اکستروژن گرم، درصد تخلخل‌ها، در اثر اعمال فشار، کاهش می‌یابد و توزیع تخلخل یکسان



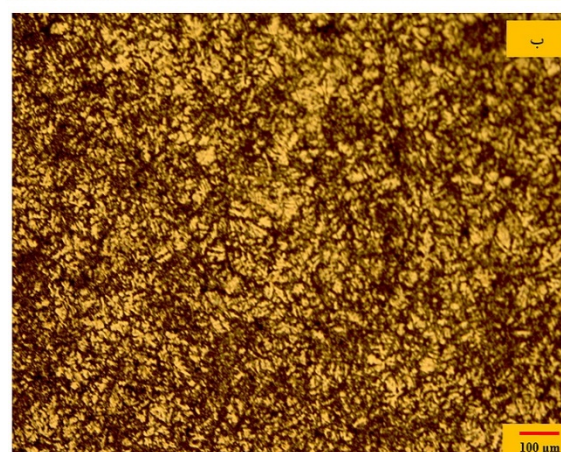
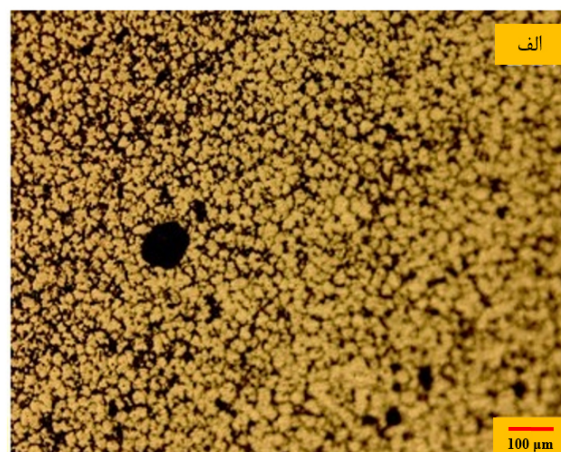
شکل ۲. تصویر میکروسکوپ نوری نمونه الف (T0-C) و ب (T0-E)

^۱ Santam

شرایط فرار گازها از داخل مذاب را به دنبال دارد و در نتیجه، چگالی کاهش می‌یابد. مقایسه بین نمونه‌های قبل و بعد از اکستروژن نشان می‌دهد که با انجام فرایند تکمیلی اکستروژن گرم، فضاهای خالی و تخلخل‌هایی که حین ریخته‌گری به وجود آمدند، تحت فشار اعمالی، کاهش و در نتیجه، چگالی نمونه‌ها، افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، مقایسه بین دو نمونه T5-C (۲/۵۸ گرم بر سانتی‌مترمکعب) و T5-E (۲/۶۳ گرم بر سانتی‌مترمکعب) نشان می‌دهد که اعمال عملیات اکستروژن باعث افزایش دو درصدی چگالی می‌شود.



شکل ۴. تصویر SEM از نمونه‌های الف (T4-C) و ب (T4-E)



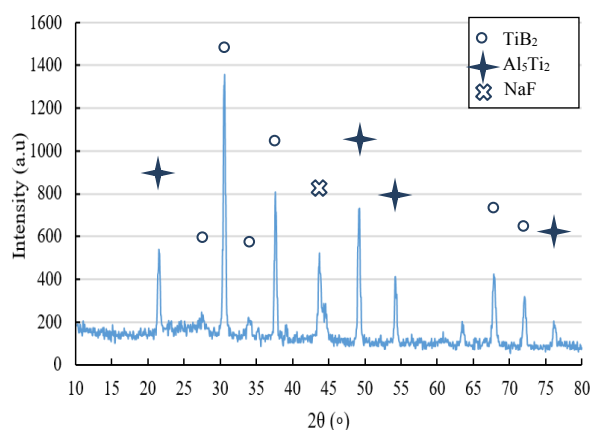
شکل ۳. تصویر میکروسکوپ نوری نمونه الف (T4-C) و ب (T4-E)

در مرحله ریخته‌گری، به دلیل انرژی سطحی، ذرات تقویت‌کننده مایل‌اند به صورت تجمعی در کنار یکدیگر قرار گیرند که این امر می‌تواند منشأ تمرکز تنش شده و باعث شکست زودرس نمونه شود. انجام اکستروژن باعث شکستن کلوخه‌ها و توزیع یکنواخت تقویت‌کننده می‌شود. شکل ۴ توزیع نانوذرات در مرحله ریخته‌گری و اکستروژن را برای نمونه حاوی ۱۰ درصد وزنی TiB_2 نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، توزیع در نمونه اکستروژن‌شده، یکنواخت‌تر است.

با توجه به جدول ۲، افزودن ۵ درصد وزنی TiB_2 به زمینه، در مقایسه با نمونه بدون تقویت‌کننده، افزایش چگالی را به دنبال دارد که علت آن، چگالی بالای تقویت‌کننده در مقایسه با زمینه است. درحالی‌که چگالی نمونه‌های با ۱۰ درصد وزنی TiB_2 در مقایسه با نمونه‌های با ۵ درصد وزنی TiB_2 ، کاهش یافته است. افزایش ذرات تقویت‌کننده تا ۱۰ درصد وزنی، باعث کاهش گرانروی مذاب شده و این کاهش گرانروی، افزایش حجم گازهای محبوس‌شده در مذاب و سخت‌شدن

۳-۲- بررسی نتایج پراش پرتو ایکس

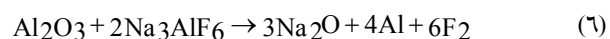
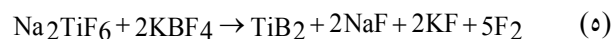
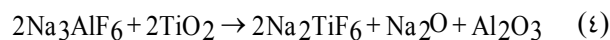
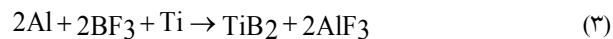
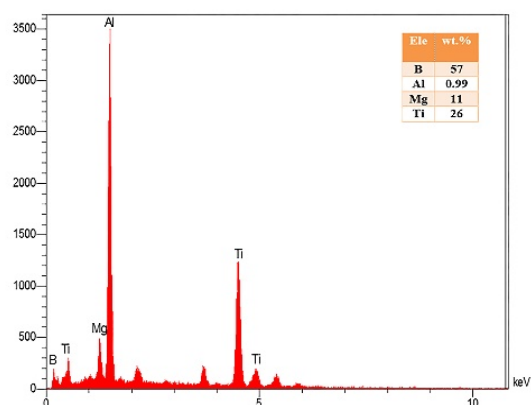
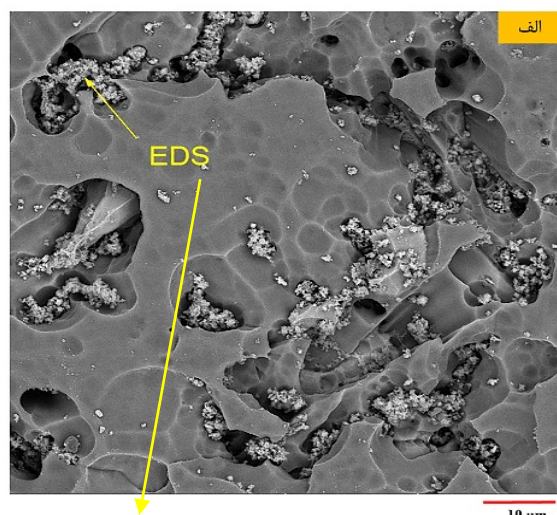
واکنش‌های (۱) تا (۶)، نحوه تشکیل فاز TiB_2 را طبق رابطه استوکیومتری، در دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس، نشان می‌دهند.



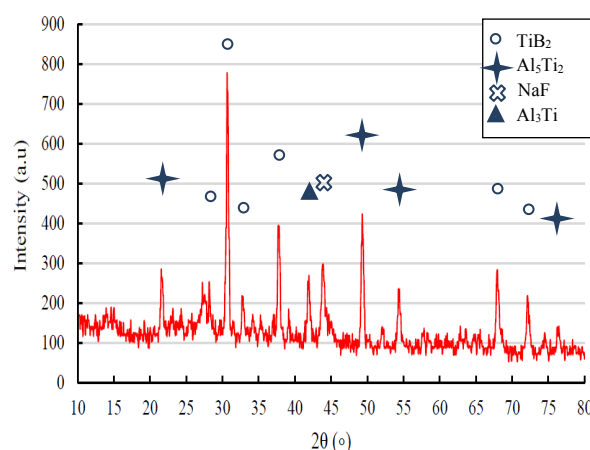
شکل ۶. الگوی پراش پرتو X نمونه T5-E

۳-۳- بررسی نتایج EDS ذرات تقویت کننده TiB₂

شکل ۷، نتایج حاصل از EDS را برای دو نمونه T1-C و T2-C نشان می‌دهد که درصد اتمی موجود برای B و Ti، به روابط استوکیومتری، نزدیک است. همان‌طور که در شکل ۶، نشان داده شده است، در نمونه T2-C، به علت وجود مواد افزودنی Zr و CeO₂، درصد وزنی Ti تشکیل شده، در مقایسه با نمونه T1-C، بیشتر است.



به منظور بررسی فازهای تشکیل شده در حین واکنش، نمونه‌های کامپوزیتی، در هیدروکلریک اسید (HCl) قرار داده شدند. پس از حذف Al₅₀₈₃، ذرات تقویت کننده به جامانده، تحت آنالیز پراش پرتو ایکس گرفت. شکل‌های ۵ و ۶، به ترتیب، آنالیز XRD از نمونه‌های T1-E و T5-E را نشان می‌دهد. با توجه به آنالیز پراش پرتو ایکس نمونه T1-E (شکل ۵)، علاوه بر فاز TiB₂، فازهای دیگری نیز تشکیل شده‌اند. در این نمونه، با شکسته شدن پیوند بین TiO₂، تیتانیوم آزاد می‌شود و با بور آزاد شده از KBF₄ واکنش می‌دهد و TiB₂ تشکیل می‌شود. همچنین، علاوه بر فاز تقویت کننده TiB₂، ترکیب بین فلزی Al₃Ti نیز دیده می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که فاز Al₃Ti، برای تشکیل TiB₂، به طور کامل، وارد واکنش نشده است. در نمونه T5-E (شکل ۶) که حاوی ۰/۲۵ درصد وزنی Zr و ۰/۵ درصد وزنی CeO₂ است، آثاری از ترکیب بین فلزی Al₃Ti دیده نمی‌شود.

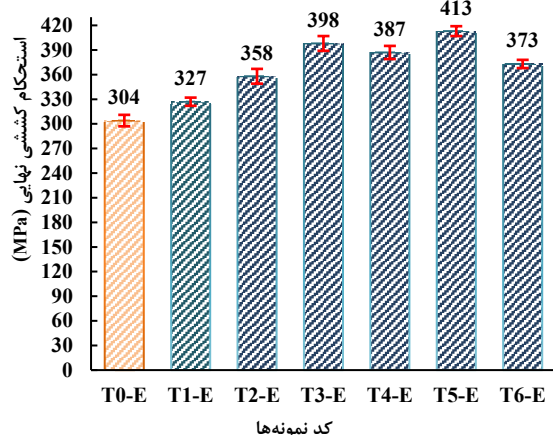


شکل ۵. الگوی پراش پرتو X نمونه T1-E

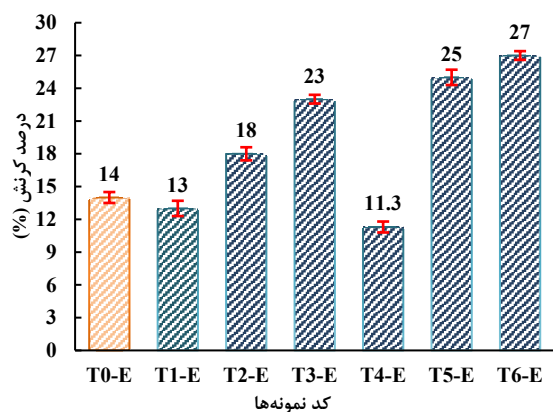
در مطالعه‌ای مشابه، احسانی و همکاران، تأثیر افزودن مستقیم TiB_2 بر خواص کششی زمینه $Al356$ را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند افزودن ذرات تقویت‌کننده و در نتیجه افزایش کارسختی، باعث بهبود استحکام و مدول کششی کامپوزیت زمینه آلومینیومی می‌شود [۲۲].

نمونه‌های $T1-E$ و $T4-E$ ، در مقایسه با نمونه بدون تقویت‌کننده، به ترتیب، کاهش ۷ و ۱۹/۳ درصدی کرنش را نشان دادند. علت این کاهش کرنش، وجود ترکیب بین‌فلزی Al_3Ti (شکل ۵) در اثر افزودن ذرات TiB_2 است.

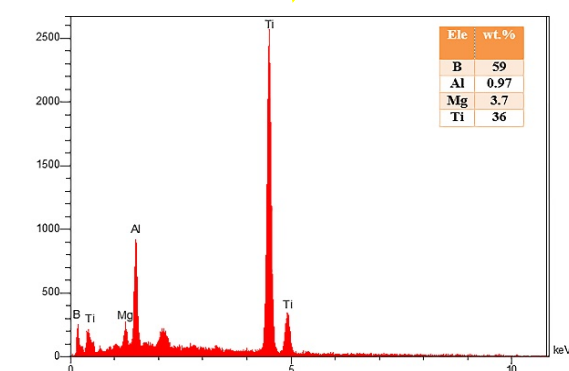
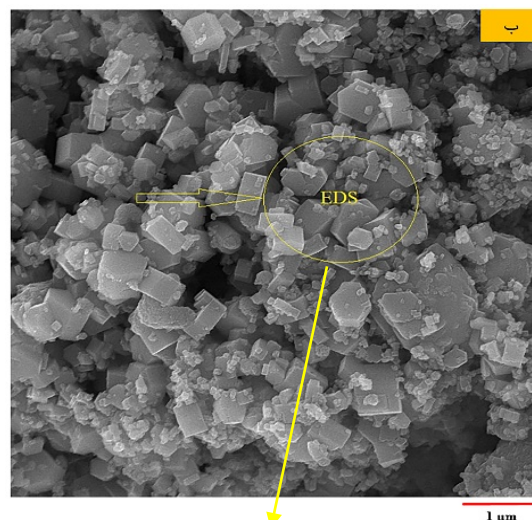
در بررسی تی و همکاران روی موضوع تأثیر افزودن ذرات TiB_2 در زمینه $Al1100$ بر خواص کششی، مشاهده کردند که افزایش ذرات تقویت‌کننده، باعث افزایش مدول و استحکام کششی کامپوزیت می‌شود، اما به دلیل حضور ترکیب بین‌فلزی Al_3Ti ، کرنش کاهش می‌یابد [۲۳].



شکل ۸. استحکام کششی نهایی کامپوزیت‌های $Al5083-TiB_2$



شکل ۹. کرنش کششی کامپوزیت‌های $Al5083-TiB_2$

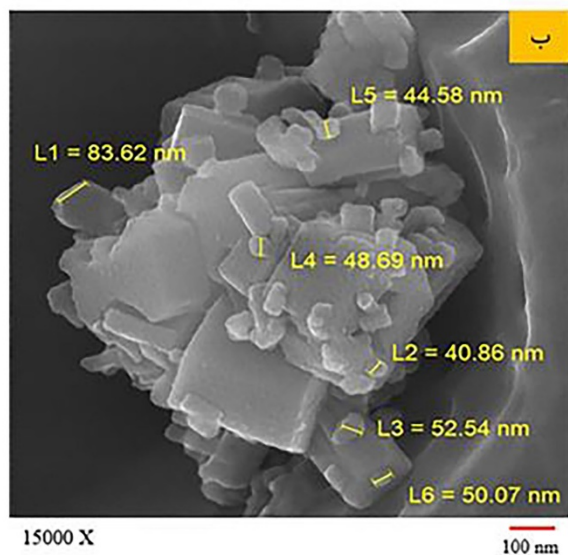
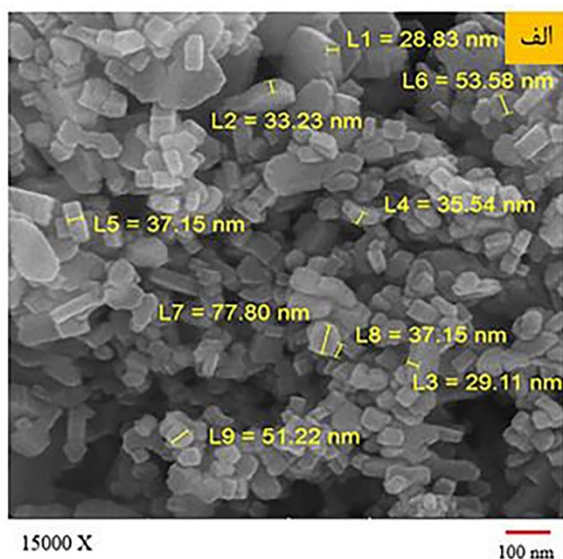


شکل ۷. آنالیز EDS برای کامپوزیت‌های الف (T1-C) و ب (T2-C)

۳-۴- خواص کششی کامپوزیت‌ها

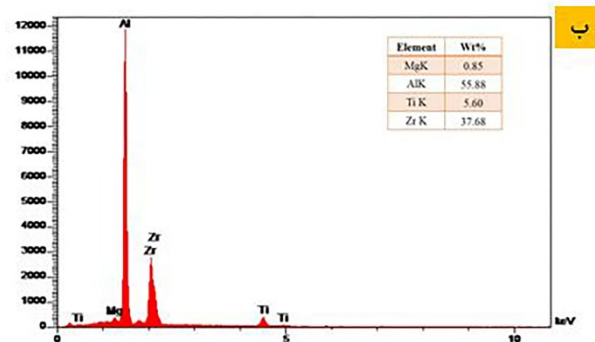
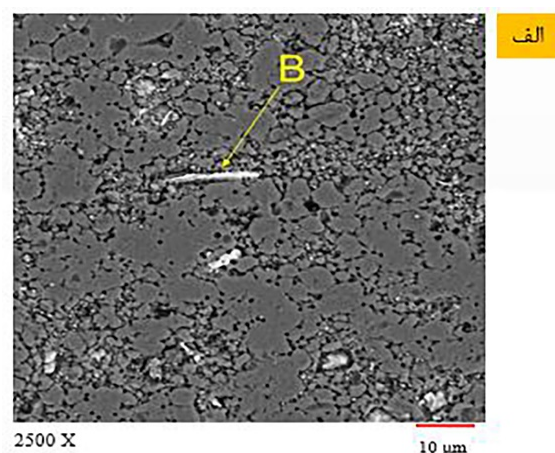
شکل‌های ۸ و ۹، استحکام و کرنش کششی کامپوزیت‌های زمینه $Al5083$ تقویت‌شده با نانوذرات TiB_2 را نشان می‌دهند. افزودن تقویت‌کننده، استحکام کششی را افزایش می‌دهد، به‌طوری که افزودن ۵ درصد وزنی TiB_2 (در نمونه $T1-E$)، باعث افزایش ۷/۵ درصدی استحکام، در مقایسه با نمونه بدون تقویت‌کننده ($T0-E$) شده است. همچنین، افزایش تقویت‌کننده تا ۱۰ درصد وزنی ($T4-E$)، افزایش ۱۷/۷ درصدی استحکام، در مقایسه با نمونه بدون تقویت‌کننده را به دنبال دارد. خواص الاستیک نانوذرات تقویت‌کننده TiB_2 و ممانعت از تغییر شکل پلاستیک زمینه، افزایش کارسختی را به دنبال دارد که باعث افزایش استحکام کششی کامپوزیت می‌شود. از طرف دیگر، اعمال تنش‌های برشی ناشی از عملیات اکستروژن بین زمینه و ذرات تقویت‌کننده، به افزایش چسبندگی بین زمینه و ذرات تقویت‌کننده منجر شده و انتقال بار از فاز زمینه به تقویت‌کننده، راحت‌تر انجام شده و باعث افزایش استحکام کششی کامپوزیت می‌شود [۲۰].

نمونه T6-E، به‌منظور بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر خواص کششی، مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد انجام مرحله آنیل، باعث کاهش استحکام کششی و افزایش کرنش می‌شود. از بین رفتن کارسختی به‌دست‌آمده از مرحله اکستروژن گرم، عامل کاهش استحکام کششی است [۲۴]. همچنین، خنک‌کردن نمونه در کوره، باعث افزایش اندازه دانه شده که طبق رابطه هال - پیچ، کاهش استحکام کششی را به‌دنبال داشت [۲۵]. شکل ۱۱ الف و ب، به‌ترتیب، تصاویر SEM نمونه‌های T5-E و T6-E را نشان می‌دهد. در این تصاویر، اندازه نانوذرات تقویت‌کننده TiB_2 مشخص است. همان‌طور که مشاهده می‌شود متوسط اندازه نانوذرات TiB_2 در نمونه T6-E، در مقایسه با نمونه T5-E، بزرگ‌تر است که علت آن، عملیات حرارتی آنیل است.



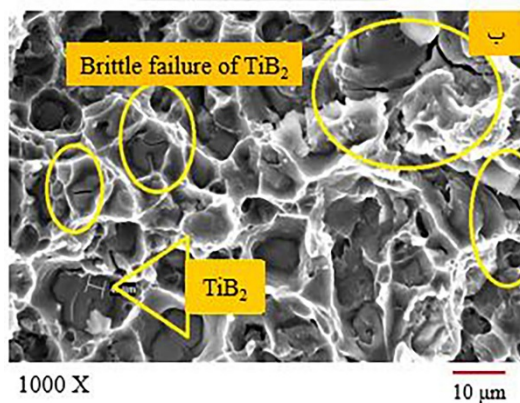
شکل ۱۱. تصاویر SEM از نمونه‌های الف) T5-E و ب) T6-E

همان‌طور که در شکل‌های ۸ و ۹ دیده می‌شود، ثابت نگه‌داشتن درصد تقویت‌کننده و افزودن Zr و CeO_2 در کامپوزیت‌ها، افزایش استحکام نهایی و کرنش را به‌دنبال دارد. در نمونه با ۵ درصد وزنی تقویت‌کننده، افزودن ۰/۲۵ درصد وزنی Zr و ۰/۵ درصد وزنی CeO_2 ، (T2-E)، بهبود استحکام کششی و کرنش تا اندازه ۳۵۸ مگاپاسکال و ۱۸ درصد را نشان می‌دهد که در مقایسه با نمونه بدون افزودنی (T1-E)، به‌ترتیب، ۹/۵ و ۳۸/۵ درصد، بیشتر است. همچنین، افزودن ۱ درصد وزنی Zr و CeO_2 ، (T3-E)، افزایش ۲۲ درصدی استحکام کششی و ۷۶/۹ درصدی کرنش را در مقایسه با نمونه T1-E نشان می‌دهد. در حالت مشابه، در نمونه با ۱۰ درصد وزنی TiB_2 ، افزودن ۰/۲۵ درصد وزنی Zr و ۰/۵ درصد وزنی CeO_2 ، (T5-E)، استحکام کششی و کرنش، در مقایسه با نمونه بدون افزودنی (T4-E)، به‌ترتیب ۷ و ۵۴/۸ درصد، بیشتر است. شکل ۱۰، شکل‌گیری فاز Al_3Zr در زمینه را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از EDS برای نقطه B، نشان می‌دهد که درصد اتمی موجود برای Zr و Al، طبق روابط استوکیومتری است.



شکل ۱۰. الف) تصویر میکروسکوپی نمونه T2-E و ب) آنالیز EDS

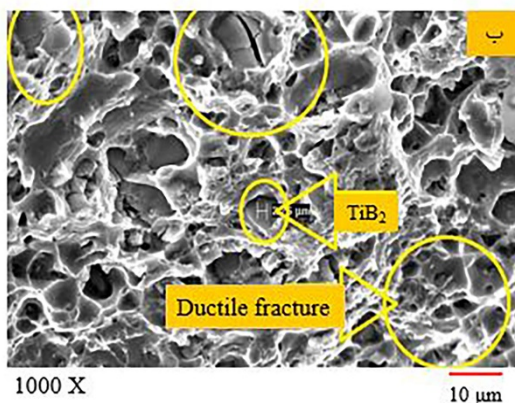
نقطه B



شکل ۱۳. الف) شکست کامپوزیت T1-E و ب) تصویر

میکروسکوپی از سطح شکست کامپوزیت T1-E

در نمونه T2-E نیز، شکست ترد ذرات تقویت‌کننده (دایره‌های زردرنگ) به‌وضوح قابل‌رویت است. اتصال بین زمینه و تقویت‌کننده، در این شکل، نیز قوی است و جدایش در فصل مشترک این دو فاز دیده نمی‌شود. افزودن Zr باعث تبدیل ترکیب بین‌فلزی Al_3Ti به TiB_2 می‌شود و کاهش رفتار ترد کامپوزیت و افزایش شکست نرم را به‌دنبال دارد. علت افزایش میزان کرنش در نمونه T2-E، در مقایسه با نمونه T1-E، افزودن Zr است (شکل ۱۴).

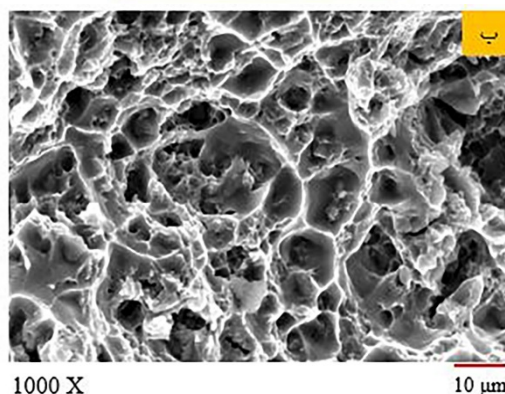
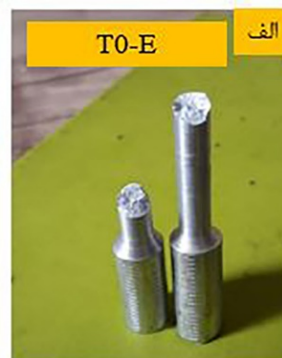


شکل ۱۴. الف) شکست کامپوزیت T2-E و ب) تصویر

میکروسکوپی از سطح شکست کامپوزیت T2-E

۳-۵- بررسی سطوح شکست

شکل ۱۲، تصاویر سطوح شکست آلیاژ Al5083 بدون ذرات تقویت‌کننده (T0-E) را نشان می‌دهد. در این نمونه، با توجه به اندازه و عمق نواحی شکست، نوع شکست نرم است.



شکل ۱۲. الف) شکست نمونه T0-E و ب) تصویر میکروسکوپی از

سطح شکست نمونه T0-E

نوع شکست در کامپوزیت T1-E، ترکیبی از دو نوع شکست نرم زمینه و شکست ترد ذرات تقویت‌کننده (دایره‌های زردرنگ) و فاز Al_3Ti است (شکل ۱۳). وجود پیوند قوی در فصل مشترک بین تقویت‌کننده و زمینه، به‌خوبی دیده می‌شود. این چسبندگی مناسب زمینه و تقویت‌کننده باعث شده است جدایش بین این دو فاز، در تصاویر میکروسکوپی دیده نشود.



۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر ۵ و ۱۰ درصد وزنی ذرات TiB_2 و افزودنی‌های Zr و CeO_2 بر ریزساختار و خواص کششی کامپوزیت زمینه Al_{5083} مطالعه شد. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

- ۱- انجام عملیات ثانویه اکستروژن و افزودن ۵ درصد وزنی TiB_2 ، باعث کاهش تخلخل و افزایش چگالی نمونه‌های ریخته‌گری شد. اما افزودن ۱۰ درصد وزنی TiB_2 به زمینه، باعث افزایش گرانروی و حفرات داخل کامپوزیت شد که کاهش چگالی نسبت نمونه بدون تقویت‌کننده را به دنبال داشت. همچنین، اکستروژن باعث شکستن کلوخه‌ها و توزیع یکنواخت تقویت‌کننده شد.
- ۲- افزودن تقویت‌کننده TiB_2 ، باعث افزایش استحکام کششی و کاهش کرنش شد. اما افزودن Zr و CeO_2 ، به علت حذف ترکیب بین‌فلزی Al_3Ti ، افزایش هر دو خواص استحکام کششی و کرنش را به همراه داشت.
- ۳- بررسی سطح شکست، افزایش رفتار ترد، با افزودن فاز تقویت‌کننده را نشان داد. اما افزودن Zr و CeO_2 ، افزایش شکست نرم، در مقایسه با شکست ترد را نشان داد.

۵- سپاسگزاری

از تمامی اساتیدی که ما را در امر پژوهش و نگارش این مقاله یاری کردند، بسیار سپاسگزاریم. همچنین، از حمایت‌های دانشگاه صنعتی مالک اشتر نیز کمال تشکر را داریم.

مراجع

4. Hashim, J., Looney, L., Hashmi, M., "Metal matrix composites: Production by the stir casting method", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 92-93, (1999), 1-7. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00118-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00118-1)
5. Reddy, M. P., Shakoor, R. A., Parande, G., Manakari V., Ubaid, F., Mohamed, A., Gupta, M., "Enhanced performance of nano-sized SiC reinforced Al metal matrix nanocomposites synthesized through microwave sintering and hot extrusion techniques", *Progress in Natural Science: Materials International*, Vol. 27, No. 5, (2017), 606-614. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2017.08.015>
6. Xue, J., Wang, J., Han, Y., Li, P., Sun, B., "Effects of CeO_2 additive on the microstructure and mechanical properties of in situ TiB_2/Al composite", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, No. 5, (2011), 1573-1578. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.10.152>
7. Li, H., Wang, X., Chai, L., Wang, H., Chen, Z., Xiang, Z., Jin, T., "Microstructure and mechanical properties of an in-situ $TiB_2/Al-Zn-Mg-Cu-Zr$ composite fabricated by Melt-SHS process", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 720, (2018), 60-68. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.02.025>
8. Wang, Y., Fang, C., Zhou, L., Hashimoto, T., Zhou, X., Ramasse, Q., Fan, Z., "Mechanism for Zr poisoning of Al-Ti-B based grain refiners", *Acta Materialia*, Vol. 164, (2019), 428-439. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.10.056>
9. Hosseini, S. A., Ranjbar, K., Dehmolaei, R., Amirani, A. R., "Fabrication of Al_{5083} surface composites reinforced by CNTs and cerium oxide nano particles via friction stir processing", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 622, (2014), 725-733. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.10.158>
10. Tsuo, Y., Yoshida, K., Atsuta, M., "Effects of alumina-blasting and adhesive primers on bonding between resin luting agent and zirconia ceramics", *Dental Materials Journal*, Vol. 25, No. 4, (2006), 669-674. <https://doi.org/10.4012/dmj.25.669>
11. Hashim, J., Looney, L., Hashmi, M. S. J., "The wettability of SiC particles by molten aluminium alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 119, No.1-3, (2001), 324-328. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00975-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00975-X)
12. Akhlaghi, A., Noghani, M., Emamy, M., "The effect of La-intermetallic compounds on tensile properties of Al-15 % Mg_2Si in-situ composite", *Procedia Materials Science*, Vol. 11, (2015), 55-60. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.11.085>
13. Alemi Ardakani, E., Kalantar, M., Mosallae Pour, M., Ghasemi Banad Kouki, S., "Production and characterization of in-situ Al-Mn- Al_2O_3 composite produced in Al-Mn O_2 system", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No.3, (2016), 277-284. http://jstc.iut.ac.ir/article_21374.html
14. Alipour, M., Eslami-Farsani, R., "Investigation of the microstructure and hardness of cast AA7068 nanocomposite reinforced with SiC nanoparticles", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 4, (2019), 461-468. http://jstc.iut.ac.ir/article_30795_en.html
15. Hedayatian, M., Vahedi, K., Nezamabadi, A., Momeni, A., "Effect of graphene oxide reinforcement on the ballistic properties of Al_{6061} - nanocomposites", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 3, (2019), 401-410. http://jstc.iut.ac.ir/article_36092_en.html
16. Feng, C. F., Froyen, L., "Microstructures of in situ Al/TiB_2 MMCs prepared by a casting route", *Journal of Materials Science*, Vol. 35, No. 4, (2000), 837-850. <https://doi.org/10.1023/A:1004729920354>
17. Wang, M., Chen, D., Chen, Z., Wu, Y., Wang, F., Ma, N., Wang, H., "Mechanical properties of in-situ TiB_2/Al_{356} composites", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 590, (2013), 246-254. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.10.021>
18. Bathula, S., Anandani, R. C., Dhar, A., Srivastava, A., "Microstructural features and mechanical properties of $Al_{5083}/SiCp$ metal matrix nanocomposites produced by high energy ball milling and spark plasma sintering", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 545, (2012), 97-102. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.02.095>
19. Chen, Z., Wang, T., Zheng, Y., Zhao, Y., Kang, H., Gao, L., "Development of TiB_2 reinforced aluminum foundry alloy based in situ composites-Part I: An improved halide salt route to fabricate Al-5 wt % TiB_2 master composite", *Materials Science*
1. Zarghami, F., Farashiani, A., Razavi, M., "The effect of V_2O_5 addition on the microstructure and mechanical properties of Al- V_2O_5 composites prepared by spark plasma sintering", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 7, No. 3, (2018), 43-54. https://www.jamt.ir/article_91773.html?lang=en
2. Abdollahi Azghani, M., Eslami-Farsani, R., "Experimental investigation of effect of thermal cycling and metal surface treatment on flexural properties laminate composite of aluminium-epoxy/basalt fibers", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, (2017), 369-376. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-12103-en.html>
3. Xin-Min, M., Rui-Juan, X., Hao, W., Wei-Min, W., "Electronic structure and chemical bond of titanium diboride", *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, Vol. 18, No. 2, (2003), 11-14. <https://doi.org/10.1007/BF02838790>

23. Tee, K. L., Lu, L., Lai, M. O., "In situ stir cast Al-TiB₂ composite: processing and mechanical properties", *Materials Science and Technology*, Vol. 17, No. 2, (2001), 201-206. <https://doi.org/10.1179/026708301101509863>
24. Tahreen, N., Zhang, D. F., Pan, F. S., Jiang, X. Q., Li, D. Y., Chen, D. L., "Hot deformation and work hardening behavior of an extruded Mg-Zn-Mn-Y alloy", *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 31, No. 12, (2015), 1161-1170. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2015.10.001>
25. Crimp, M. A., Vedula, K., "The relationship between cooling rate, grain size and the mechanical behavior of B₂Fe-Al alloys", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 165, No. 1, (1993), 29-34. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(93\)90623-M](https://doi.org/10.1016/0921-5093(93)90623-M)
- and *Engineering: A*, Vol. 605, (2014), 301-309. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.02.088>
20. Suresh, S., Shenbag, N., Moorthi, V., "Aluminium-titanium diboride (Al-TiB₂) metal matrix composites: challenges and opportunities", *Procedia Engineering*, Vol. 38, (2012), 89-97. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.013>
21. ASTM E8/E8M-15a, "Standard test methods for tension testing of metallic materials", *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2015). https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-15A
22. Ehsani, N., Abdi, F., Abdizadeh, H., Baharvandi, H. R., "The effect of TiB₂ powder on microstructure and mechanical behavior of Al-TiB₂ metal matrix composites", *Proceedings of SPIE 6423, International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering*, Vol. 6423, (2008), 642369. <https://doi.org/10.1117/12.791738>