

Research Paper

Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Al5083 Composite Reinforced with In-Situ TiB₂ Particles

Alireza Jafari Pirlari¹, *Massoud Emany², Meysam Naghizadeh³

1- PhD Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

3- MSc, School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Citation: Jafari Pirlari A, Emany M, Naghizadeh M. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Al5083 Composite Reinforced with In-Situ TiB₂ Particles. Metallurgical Engineering 2019; 21(4): 292-299 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2019.91840.1203>

doi: <http://dx.doi.org/10.22076/me.2019.91840.1203>

ABSTRACT

Microstructural evolution and mechanical properties of in-situ Al5083 composites with 1 and 5 volume percent of TiB₂ reinforcement particles were investigated. It was revealed that hot extrusion process results in a uniform, more homogeneous and less clustered structure of TiB₂ particles compared with the as-cast structures. Scanning electron microscopy showed that TiB₂ particles in the Al5083-1 vol% TiB₂ composite have a nearly equiaxed morphology and round shape with an average size of ~ 0.5 μm. While, the morphology of TiB₂ particles in Al5083-5 vol% TiB₂ composite is hexagonal with an average size of ~ 2 μm. Also, the grain size reduces by adding TiB₂ reinforcement particles to the Al5083 alloy. It was shown that the hardness, yield strength, young's modulus, and ultimate tensile strength of the Al5083-TiB₂ composites increase with increasing TiB₂ content. This can be attributed to the effect of TiB₂ particles as a high hardness reinforcement phase and also the smaller grain size of the matrix which was resulted by adding the TiB₂ particles.

Keywords: Al 5083, In-situ composite, Titanium diboride, Mechanical properties, Microstructural evolution.

■ ■

* **Corresponding Author:**

Massoud Emany, PhD

Address: School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Tel: +98 (21) 82084083

E-mail: emamy@ut.ac.ir

تحول ریزساختاری و خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیم ۵۰۸۳ تقویت شده با ذرات درجای دی بورید تیتانیم (TiB₂)

علیرضا جعفری پیرلری^۱، مسعود امامی^۲، میثم نقی زاده^۳

- ۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
 ۲- استاد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
 ۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

در این پژوهش تغییر ریز ساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت درجای آلومینیم ۵۰۸۳ با مقادیر ۱ و ۵ درصد حجمی دی بورید تیتانیم مورد بررسی قرار گرفته است. مشخص شد که با انجام فرآیند اکستروژن داغ یکنواختی توزیع ذرات تقویت کننده دی بورید تیتانیم بیشتر شده و از کلوخه‌های شدن ذرات در مقایسه با ساختار ریختگی کاسته می‌شود. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که ساختار این ذرات در کامپوزیت ۱ درصد حجمی، تقریباً کروی شکل و هم‌محور و با اندازه‌ای حدود ۰/۵ میکرومتر است در حالی که این ساختار در کامپوزیت ۵ درصد حجمی به شکل هگزاگونال و با اندازه‌ای حدود ۲ میکرومتر می‌باشد. همچنین مشاهده شد که با افزایش ذرات دی بورید تیتانیم، اندازه دانه فاز زمینه آلومینیم ۵۰۸۳ کاهش می‌یابد. بررسی خواص مکانیکی نشان داد که با افزایش مقدار دی بورید تیتانیم، سختی، استحکام تسلیم، مدول الاستیک و استحکام کششی نهایی کامپوزیت افزایش می‌یابد که این موضوع به دلیل وجود ذرات سخت و مستحکم دی بورید تیتانیم و کاهش اندازه دانه، ناشی از حضور این ذرات است.

واژه‌های کلیدی: آلومینیم ۵۰۸۳؛ کامپوزیت درجا؛ دی بورید تیتانیم؛ خواص مکانیکی؛ تحول ریزساختاری.

۱. مقدمه

آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ یک آلیاژ غیرقابل عملیات حرارتی بوده و عنصر اصلی آن منیزیم می‌باشد. این آلیاژ به دلیل داشتن خواص خوب مانند استحکام و انعطاف پذیری مناسب، مقاومت به خوردگی عالی و جوش پذیری بالا توجه قابل ملاحظه‌ای را به خود جلب کرده است. همین موضوع باعث استفاده روزافزون این آلیاژ در بسیاری از کاربردهای مهندسی به ویژه کاربردهای دریایی شده است. درعین حال، استحکام و انعطاف پذیری این آلیاژها در حالت آنیل شده نسبتاً پایین است و همین موضوع به عنوان مانعی برای برخی از کاربردهای مورد نظر در این نوع آلیاژها است [۱-۵]. از این رو، روش‌های متفاوتی مانند فرآیندهای ترمومکانیکی، تغییر شکل پلاستیک شدید و ساخت کامپوزیت‌های درجای این آلیاژها برای بهبود خواص مکانیکی آن‌ها به کار گرفته شده است. از این بین، کامپوزیت‌های درجای زمینه آلومینیمی تقویت شده با ذرات سرامیکی مانند TiC، ZrB₂، AlN، Al₂O₃، Mg₂Si و TiB₂ به دلیل نسبت استحکام به وزن بالای خود، مقاومت

سایشی و همچنین مقاومت حرارتی بالاتر در مقایسه با آلیاژ فلزی و کامپوزیت‌های غیر درجا، توجه بسیاری از محققان و صنعتگران را به خود جلب کرده‌اند [۶-۱۴]. همچنین برخی از این ذرات به دلیل ایجاد مکان‌های جوانه‌زنی نقش بسیار مهمی در ریزدانه‌گی کامپوزیت مورد نظر نیز ایفا می‌کنند. در میان این ذرات سرامیکی، دی بورید تیتانیم (TiB₂) به دلیل استحکام زیاد، نقطه ذوب بالا (۲۷۹۰ درجه سانتی‌گراد)، مدول الاستیک بالا (۵۳۰ گیگاپاسکال) و پایداری حرارتی عالی، بیشتر مورد استفاده محققان قرار گرفته است. در فرآیندهای ریخته‌گری درجا، تقویت کننده در طول فرایند ساخت کامپوزیت با انجام واکنش‌های شیمیایی در زمینه ایجاد می‌شود که همین موضوع باعث چسبندگی بهتر ذرات به زمینه و ایجاد ذرات ریزتر در زمینه فلزی می‌گردد. استفاده از کامپوزیت‌های درجای TiB₂-Al به ابتدای دهه ۱۹۹۰ میلادی برمی‌گردد. ساخت این کامپوزیت‌ها با استفاده از واکنش‌های نمکی/فلزی، اکسیدی/فلزی و آمیزان/فلزی قابل انجام است که از بین روش‌های گفته شده، سنتز این کامپوزیت‌های درجا با استفاده

* نویسنده مسئول:
 دکتر مسعود امامی

نشانی: تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد.
 تلفن: ۰۲۱ ۸۲۰۸۴۰۸۳ (۲۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: emamy@ut.ac.ir

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ مورد استفاده در این تحقیق.

آلیاژ	منیزیم	منگنز	آهن	سیلیسیم	کرم	مس
آلومینیم ۵۰۸۳	۴/۸۳	۰/۸۳	۰/۲۸	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۰۳۲

در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و با استفاده از روان کار گرافیت روغنی بر روی نمونه‌ها انجام شد. نسبت اکستروژن در این فرآیند برابر با ۹:۱ بوده است.

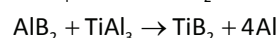
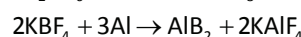
به‌منظور بررسی‌های ریزساختاری از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به دستگاه آنالیز عنصری نقطه‌ای استفاده شد. برای ارزیابی متوسط اندازه دانه از استاندارد ASTM E112 استفاده گردید. تست سختی برینلبا بار اعمالی ۱۰ کیلوگرم بر روی نمونه‌ها انجام پذیرفت. تست کشش تک‌محوری نیز مطابق با استاندارد ASTM B557M-06 بر روی نمونه‌های اکستروژن شده با سرعت فک ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد.

۳. نتایج و بحث

شکل ۱، تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های کامپوزیتی ریخته‌گری و اکستروژن شده با میزان ۱ و ۵ درصد حجمی TiB₂ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت ریختگی (شکل‌های ۱ الف و ب) ذرات TiB₂ در زمینه آلومینیم ۵۰۸۳ به‌صورت یکنواخت توزیع نشده‌اند و همچنین پدیده کلوخه‌ای شدن در این حالت در هر دو نمونه مشاهده می‌گردد. اما همان‌گونه که دیده می‌شود با انجام فرآیند اکستروژن داغ (شکل‌های ۱ ج و د) یکنواختی توزیع ذرات تقویت‌کننده TiB₂ بیشتر می‌شود. اما با این حال هنوز هم تا حدودی پدیده کلوخه‌ای شدن ذرات به‌ویژه در نمونه کامپوزیتی ۵ درصد حجمی TiB₂ مشاهده می‌شود که این موضوع به دلیل مقادیر بالای ذرات TiB₂ در این کامپوزیت و تمایل این ذرات به چسبیدن به یکدیگر و کلوخه‌ای شدن می‌باشد.

همچنین در شکل ۱ مورفولوژی ذرات TiB₂ در هر دو کامپوزیت مشاهده می‌گردد (شکل‌های ۱ ت و ج). ساختار این ذرات در کامپوزیت ۱ درصد حجمی TiB₂ تقریباً کروی شکل و هم‌محور بوده و میانگین اندازه این ذرات کمتر از ۵۰۰ نانومتر است. این ساختار هم‌محور به دلیل نداشتن گوشه‌های تیز و عدم ایجاد تمرکز تنش، در واقع ساختار مرجح بوده و می‌تواند منجر به بهبود خواص مکانیکی گردد. ساختار این ذرات در کامپوزیت ۵ درصد حجمی TiB₂ هگزاگونال بوده و هنوز به‌طور کامل تبدیل به ساختار هم‌محور و کروی شکل نشده است که این موضوع نیز به دلیل میزان بالای ذرات TiB₂ در ساختار است. تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد که شکل‌گیری ساختار هگزاگونال ناشی از رشد ترجیحی ذرات تقویت‌کننده TiB₂ در جهت < 1120 > در دماهای بالای فرآیند است. میانگین اندازه

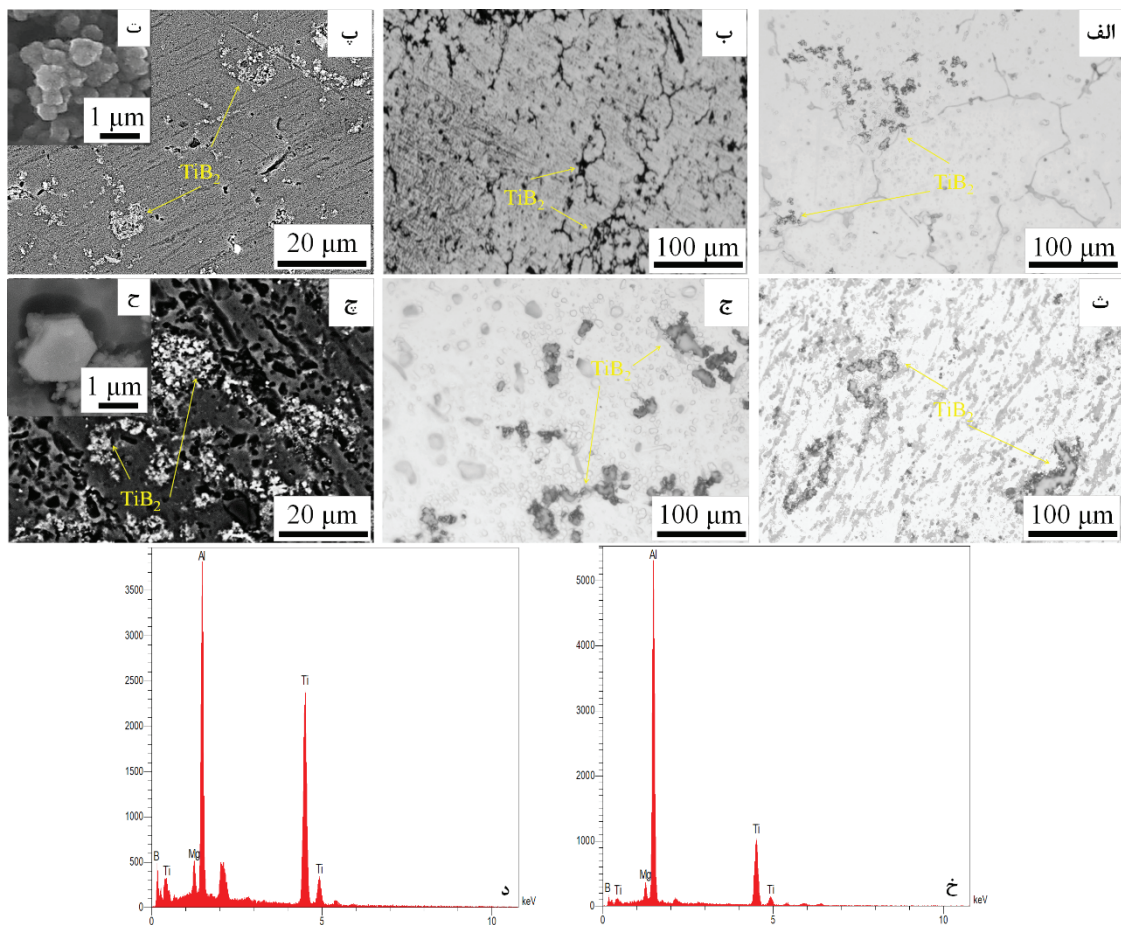
از دو نمک KBF₄ و K₂TiF₆ به دلیل ایجاد خواص مکانیکی مناسب‌تر، بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است [۱۵-۱۹]. تولید این کامپوزیت‌ها با استفاده از روش نمکی توسط شرکت London and Scandinavian Metallurgical Co. Ltd در سال ۱۹۹۳ ابداع شد و از همان زمان تحقیقات بر روی آن‌ها شروع شد. واکنش بین مذاب آلومینیم و نمک‌های KBF₄ و K₂TiF₆ که منجر به تشکیل TiB₂ می‌گردد توسط بسیاری از محققان به‌صورت زیر گزارش شده است [۲۰]:



اگرچه سنتز این کامپوزیت‌های درجا در بسیاری از آلیاژهای آلومینیم انجام شده است [۲۱-۲۷] اما تحقیقات بسیار کمی بر روی خواص کامپوزیت‌های در جای آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ با استفاده از ذرات تقویت‌کننده TiB₂ صورت گرفته است. هدف از این تحقیق بررسی بیشتر تحولات ریزساختاری و خواص مکانیکی کامپوزیت در جای Al5083-TiB₂ سنتز شده با استفاده از روش نمکی است.

۲. مواد و روش تحقیق

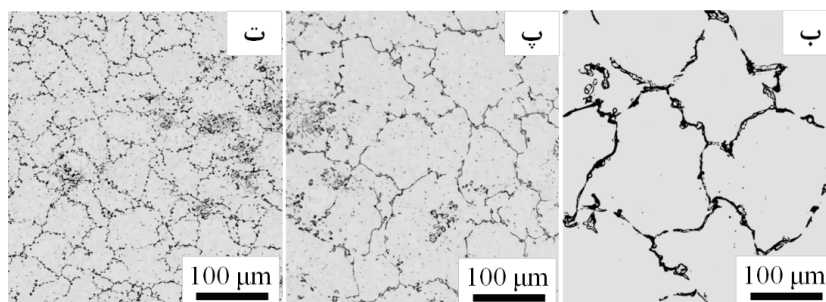
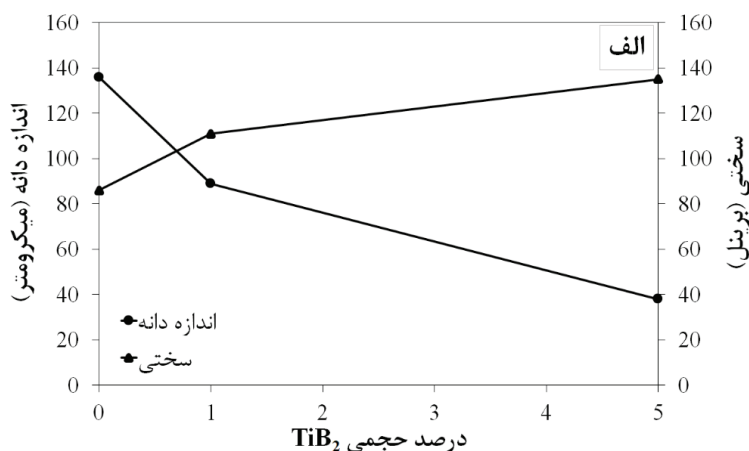
در این تحقیق از آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ (با ترکیب شیمیایی مطابق با جدول ۱) برای تشکیل زمینه کامپوزیت و از نمک‌های KBF₄ و K₂TiF₆ جهت ایجاد فاز تقویت‌کننده TiB₂ استفاده شد. ابتدا شمش آلومینیم ۵۰۸۳ با استفاده از کوره القایی و با دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در بوته‌های گرافیتی ذوب شده و مقادیر مختلف نمک‌های KBF₄ و K₂TiF₆ جهت ایجاد فاز تقویت‌کننده TiB₂ به میزان ۱ (۱/۶۶ درصد وزنی) و ۵ (۱/۱ درصد وزنی) درصد حجمی به آن اضافه شد. لازم به ذکر است که استفاده از کوره القایی باعث ایجاد جریان گردابی و اختلاط مناسب اجزای مخلوط می‌شود. بنابراین پس از اضافه کردن نمک‌ها، به مدت ۲۰ دقیقه مخلوط آلیاژ و نمک‌ها در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد و پس از آن نیز به‌منظور اطمینان بیشتر از انجام واکنش بین نمک‌ها و فاز زمینه، با استفاده از همزن دستی گرافیتی نیز به مدت ۵ دقیقه، مخلوط هم زده شد. در نهایت مخلوط نمک‌ها و فاز زمینه به مدت دو دقیقه بدون هم زدن نگاه‌داشته شد و سپس فرآیند ریخته‌گری در قالب‌های استوانه‌ای فولادی (با دمای اتاق) انجام شد. پس از فرآیند ریخته‌گری، عملیات اکستروژن



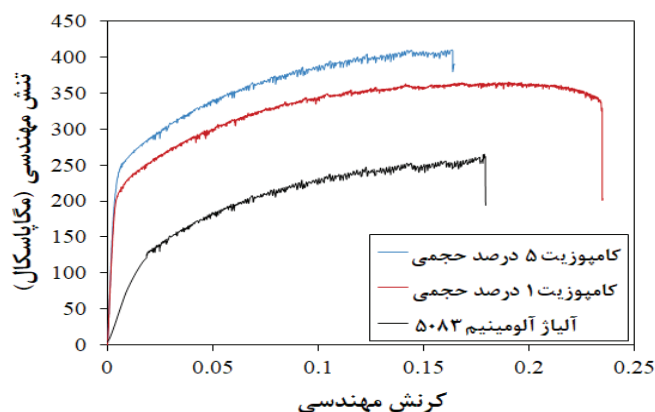
شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ نوری از ساختار ریخته‌گری نمونه‌های کامپوزیتی (الف) ۱ درصد حجمی TiB_2 و (ب) ۵ درصد حجمی TiB_2 و ساختار اکستروژ شده نمونه‌های کامپوزیتی (ج) ۱ درصد حجمی TiB_2 و (د) ۵ درصد حجمی TiB_2 . تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ساختار اکستروژ شده نمونه‌های کامپوزیتی (پ و ت) ۱ درصد حجمی TiB_2 و (چ و ح) ۵ درصد حجمی TiB_2 . نتایج آنالیز عنصری مربوط به ساختار اکستروژ شده نمونه‌های کامپوزیتی (خ) ۱ درصد حجمی TiB_2 و (د) ۵ درصد حجمی TiB_2 .

شکل ۲، اثر ذرات تقویت‌کننده TiB_2 بر سختی و اندازه دانه فاز زمینه آلومینیم 50.83% و ریزساختارهای مرتبط با آن‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ذرات TiB_2 به ۱ و ۵ درصد حجمی، اندازه دانه از حدود ۱۳۶ میکرومتر به ترتیب به حدود ۸۹ و ۳۸ میکرومتر کاهش می‌یابد. در واقع این کاهش اندازه دانه ارتباط مستقیم با میزان ذرات TiB_2 موجود در ساختار دارد. اولاً ذرات TiB_2 تشکیل‌شده به صورت درجا در حین فرآیند انجماد به‌عنوان مانعی برای رشد دانه‌های فاز زمینه عمل می‌کنند و کاهش اندازه دانه را موجب می‌شوند. از طرف دیگر این ذرات به‌عنوان مکان‌های مناسب جوانه‌زنی برای دانه‌های فاز زمینه عمل کرده و این موضوع نیز باعث تشکیل دانه‌های بیشتر و کاهش اندازه دانه فاز زمینه می‌شود [۲۹]. همچنین همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود سختی نمونه‌های کامپوزیتی با افزایش میزان ذرات TiB_2 افزایش می‌یابد که این موضوع به دلیل افزایش فاز سخت و مستحکم TiB_2 و از طرفی کاهش اندازه دانه ناشی از حضور این ذرات تقویت‌کننده است.

این ذرات در حدود ۲ میکرومتر می‌باشد که حدود ۴ برابر بزرگ‌تر از اندازه ذرات مشابه در کامپوزیت ۱ درصد حجمی TiB_2 است. این نوع مورفولوژی در مقایسه با ساختار هم‌محور از مساحت سطحی بالاتری برخوردار است و می‌تواند در حین تست کشش منجر به ایجاد حفرات عمیق‌تر و بزرگ‌تر شده و شکست سریع‌تر نمونه را موجب شود. همچنین از نقاط موجود موسوم به TiB_2 در تصاویر شکل ۱، آنالیز عنصری نقطه‌ای (EDS spot analysis) گرفته شد تا نشان داده شود که ذرات موجود در تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی، ذرات TiB_2 است. نتایج این آنالیز عنصری نیز در شکل‌های ۱ خ و د قابل مشاهده است. همچنین بر اساس بررسی‌های انجام‌شده وجود احتمالی ذرات $TiAl_3$ و AlB_2 نیز در ساختار مشاهده نشد که این موضوع با نتایج آقای یو و همکاران [۲۸] نیز در تطابق است. آن‌ها محاسبات ترمودینامیکی برای واکنش نمک‌های KBF_4 و K_2TiF_6 در مذاب آلومینیم را گزارش کرده و متوجه شدند که در دماهای بالای انجام واکنش، ΔG_{TiB_2} منفی‌تر از ΔG_{TiAl_3} و ΔG_{AlB_2} است و بنابراین تنها فاز پایدار، فاز TiB_2 است.



شکل ۲. الف) اثر میزان ذرات تقویت کننده TiB₂ بر سختی و اندازه دانه فاز زمینه آلومینیم ۵۰۸۳. ب) ریز ساختار ب) آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳، پ) کامپوزیت اکسترود شده ۱ درصد حجمی TiB₂ و ت) کامپوزیت اکسترود شده ۵ درصد حجمی TiB₂.



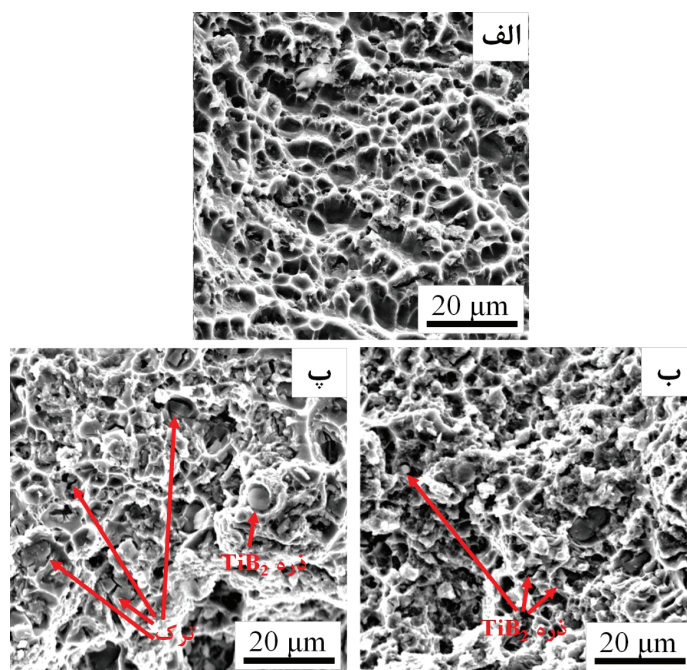
شکل ۳. منحنی های تنش - کرنش مهندسی برای نمونه های اکسترود شده آلومینیم ۵۰۸۳ و کامپوزیت های این ماده با ۱ و ۵ درصد حجمی فاز TiB₂.

پلاستیک نمی دهد و مطابق با مکانیزم اوروان به عنوان مانعی در مقابل حرکت نابجایی ها عمل می کند که همین موضوع باعث افزایش استحکام ماده می شود. از طرفی TiB₂ موجود در ساختار باعث کاهش اندازه دانه می گردد و اثبات شده است که کاهش اندازه دانه هم زمان استحکام ماده و انعطاف پذیری آن را افزایش می دهد [۳۰]. در واقع کاهش اندازه دانه هم از طرفی یک مکانیزم استحکام بخشی است و از طرف دیگر مرزها به عنوان مانعی در مقابل رشد ترک ها عمل کرده و انعطاف پذیری ماده را افزایش داده و شکست ماده را به تعویق می اندازند.

شکل ۳، منحنی های تنش - کرنش مهندسی را برای نمونه های اکسترود شده آلومینیم ۵۰۸۳ و کامپوزیت های این ماده با ۱ و ۵ درصد حجمی فاز TiB₂ نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش ذرات TiB₂ به ۱ درصد حجمی هم استحکام کششی نهایی از ۲۶۵ به ۳۶۵ مگاپاسکال و هم انعطاف پذیری ماده از ۱۸ به ۲۳/۵ درصد افزایش می یابد. افزایش هم زمان استحکام و انعطاف پذیری به طور مستقیم به حضور ذرات درجای تقویت کننده TiB₂ بستگی دارد. TiB₂ یک فاز سخت و مستحکم است که در حین آزمون کشش تغییر شکل

چشمگیری را از خود نشان نمی‌دهد (از ۱۸ به ۱۶/۵ درصد). این نتایج به صورت خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است. نکته قابل توجه دیگر افزایش استحکام تسلیم با افزایش میزان TiB_2 است. همچنین مدول الاستیک مواد کامپوزیتی نیز در مقایسه با آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ افزایش چشمگیری را از خود نشان می‌دهد که این موضوع به خوبی در تطابق با کامپوزیت شدن آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ بوده و اثر حضور ذرات تقویت کننده TiB_2 (با مدول الاستیک ۵۳۰ گیگاپاسکال) را نشان می‌دهد. شکل ۴، سطوح شکست نمونه‌های شکل ۳ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود شکست در آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ یک شکست نرم بوده و حفرات (دیمپل‌ها) موجود در سطح شکست شاهد این مدعا است (شکل ۴ الف). شکست در کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات به دو صورت می‌تواند اتفاق بیفتد: (۱) شکسته شدن ذره و (۲) کنده شدن ذره. در حین اعمال نیرو به کامپوزیت، زمینه به طور پلاستیک تغییر شکل می‌دهد و تنش به ذرات تقویت کننده منتقل می‌شود. استحکام فصل مشترک ذره با زمینه فاکتور

همچنین در شکل ۳ می‌توان دید که با افزایش ذرات TiB_2 از ۱ به ۵ درصد حجمی، استحکام کششی نهایی ماده از ۳۶۵ به ۴۱۰ مگاپاسکال افزایش یافته درحالی که انعطاف پذیری آن از ۲۳/۵ به ۱۶/۵ درصد کاهش می‌یابد. افزایش استحکام کامپوزیت، ناشی از افزایش میزان ذرات TiB_2 و کاهش اندازه دانه است. اما بر خلاف نمونه کامپوزیت ۱ درصد حجمی TiB_2 ، با وجود کاهش اندازه دانه، انعطاف پذیری کامپوزیت ۵ درصد حجمی TiB_2 کاهش یافته است که این موضوع به دلیل ذرات بزرگ‌تر، میزان بیشتر آن و مورفولوژی هگزگونال شکل ذرات در این کامپوزیت است. در واقع با وجود این ذرات بزرگ‌تر و میزان بالای آن مکانیزم اوروان و دور زدن ذرات توسط نابجایی‌ها به خوبی انجام نمی‌شود و نابجایی‌ها قادر به ادامه حرکت نیستند. بنابراین انعطاف پذیری این کامپوزیت نسبت به کامپوزیت ۱ درصد حجمی TiB_2 کاهش می‌یابد. این در حالی است که در مقایسه با نمونه آلومینیم ۵۰۸۳، به دلیل کاهش قابل توجه اندازه دانه (از ۱۳۶ به ۳۸ میکرومتر)، انعطاف پذیری کامپوزیت ۵ درصد حجمی TiB_2 کاهش



شکل ۴. سطوح شکست نمونه‌های اکستروژده شده (الف) آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳، (ب) کامپوزیت آلومینیم ۵۰۸۳ حاوی ۱ درصد حجمی TiB_2 و (پ) کامپوزیت آلومینیم ۵۰۸۳ حاوی ۵ درصد حجمی TiB_2 .

جدول ۲. میانگین اندازه دانه و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ و کامپوزیت‌های آن.

ماده	میانگین اندازه دانه (میکرومتر)	سختی (برینل)	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	استحکام کششی نهایی (مگاپاسکال)	انعطاف پذیری (درصد)
آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳	۱۳۶	۸۶	۱۳۰	۲۶۵	۱۸
کامپوزیت ۱ درصد حجمی TiB_2	۸۹	۱۱۱	۲۰۵	۳۶۵	۲۳/۵
کامپوزیت ۵ درصد حجمی TiB_2	۳۸	۱۳۵	۲۴۰	۴۱۰	۱۶/۵

References

- [1] R. Kaibyshev, F. Musin, E. Avtokratova, Y. Motohashi, Deformation behavior of a modified 5083 aluminum alloy, *Materials Science and Engineering A*, 2005, vol. 392, pp. 373-379.
- [2] Ian Polmear, *Light alloys from traditional alloys to nanocrystals*, 4th ed., Elsevier, Melbourne, 2006.
- [3] S.K. Thakur, M. Gupta, Improving mechanical performance of Al by using Ti as reinforcement, *Composites*, 2007, vol. 38A, pp. 1010-1018.
- [4] V.L. Tellkamp, E.J. Lavernia, Processing and mechanical properties of nanocrystalline 5083 Al alloy, *Acta Metallurgica*, 1999, vol. 12, pp. 249-252.
- [5] D. Witkin, B.Q. Han, E.J. Lavernia, Microstructural evolution of an ultrafine-grained cryomilled Al 5083 alloy during thermo-mechanical processing, *Journal of Materials Research Society*, 2005, vol. 20, pp. 2117-2126.
- [6] A. Alizadeh, A. Abdollahi, H. Biukani, Creep behavior and wear resistance of Al 5083 based hybrid composites reinforced with carbon nanotubes (CNTs) and boron carbide (B₄C), *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 650, pp. 783-793.
- [7] S.A. Hossieni, K. Ranjbar, R. Dehmolaei, A.R. Amirani, Fabrication of Al5083 surface composites reinforced by CNTs and cerium oxide nano particles via friction stir processing, *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 622, pp. 725-733.
- [8] S. Bathula, R.C. Anandani, A. Dhar, A.K. Srivastava, 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*, 2012, vol. 545, pp. 97-102.
- [9] Y. Birol, In situ synthesis of Al-TiCp composites by reacting K₂TiF₆ and particulate graphite in molten aluminium, *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, vol. 454, pp. 110-117.
- [10] I. Dinaharan, N. Murugan, S. Parameswaran, Influence of in situ formed ZrB₂ particles on microstructure and mechanical properties of AA6061 metal matrix composites, *Materials Science and Engineering A*, 2011, vol. 528, pp. 5733-5740.
- [11] S.S.S. Kumari, U.T.S. Pillai, B.C. Pai, Synthesis and characterization of in situ Al-AlN composite by nitrogen gas bubbling method, *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, vol. 509, pp. 2503-2509.
- [12] M. Hoseini, M. Meratian, Fabrication of in situ aluminum-alumina composite with glass powder, *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, vol. 471, pp. 378-382.
- [13] R. Hadian, M. Emamy, N. Varahram, N. Nemati, The effect of Li on the tensile properties of cast Al-Mg₂Si metal matrix composite, *Materials Science and Engineering A*, 2008, vol. 490, pp. 250-257.
- [14] M. Emamy, H.R.J. Nodooshan, A. Malekan, The microstructure, hardness and tensile properties of Al-15% Mg₂Si in situ composite with yttrium addition, *Materials and Design*, 2011, vol. 32, pp. 4559-4566.
- [15] M. Karbalaee Akbari, H.R. Baharvandi, K. Shirvanimoghaddam, Tensile and fracture behavior of nano/micro TiB₂ particle reinforced casting A356 aluminum alloy composites, *Materials and Design*, 2015, vol. 66, pp. 150-161.
- [16] T. Wang, Y. Zheng, Z. Chen, Y. Zhao, H. Kang, Effects of Sr on the microstructure and mechanical properties of in situ TiB₂ reinforced A356 composite, *Materials and Design*, 2014, vol. 64, pp. 185-193.

بسیار مؤثر روی رفتار شکست کامپوزیت‌های حاوی ذرات است. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، مورفولوژی ذرات در کامپوزیت ۱ درصد حجمی TiB₂، کروی و هم‌محور است که چنین ذراتی دارای فصل مشترک قوی‌تری با زمینه هستند و همچنین به دلیل نداشتن گوشه‌های تیز تمرکز تنش نیز در آن‌ها کمتر است و بنابراین در مقابل شکست مقاومت بیشتری را از خود نشان می‌دهند و ماده انعطاف‌پذیری بالاتری را از خود نشان می‌دهد. اما به دلیل ریزتر بودن اندازه آن‌ها با رسیدن تنش به مقدار بحرانی شکسته شدن ذرات اتفاق افتاده و موجب شکست ماده می‌شود (شکل ۴ ب). این در حالی است که در مورد کامپوزیت با ۵ درصد حجمی TiB₂، ذرات بزرگ‌تر و با گوشه‌های تیز (مورفولوژی هگزگونال) دارای فصل مشترک ضعیف‌تری با زمینه هستند. در این شرایط معمولاً کنده شدن ذرات به دلیل ایجاد ترک‌ها در فصل مشترک ذره با زمینه اتفاق می‌افتد. درواقع به دلیل اتصال ضعیف‌تر ذره با زمینه، نیرو نمی‌تواند از زمینه به‌طور کامل به ذره منتقل‌شده و باعث ایجاد ترک‌ها می‌شود و درنهایت همین موضوع باعث کاهش انعطاف‌پذیری در این کامپوزیت‌ها و شکست آن‌ها می‌شود (شکل ۴ پ).

۴. نتیجه‌گیری

تحولات ریزساختاری و خواص مکانیکی کامپوزیت درجای آلومینیم ۵۰۸۳ با مقادیر ۱ و ۵ درصد حجمی TiB₂، مورد بررسی قرار گرفت. از مجموع این بررسی‌ها نتایج زیر را می‌توان استنتاج نمود:

- ۱- با انجام فرآیند اکستروژن داغ یکنواختی توزیع ذرات تقویت‌کننده TiB₂ بیشتر می‌شود. اما باین‌حال هنوز هم تا حدودی پدیده کلوخه‌ای شدن ذرات به‌ویژه در نمونه کامپوزیتی ۵ درصد حجمی TiB₂ مشاهده می‌شود که این موضوع به دلیل مقادیر بالای ذرات TiB₂ در این کامپوزیت و تمایل این ذرات به کلوخه‌ای شدن می‌باشد.
- ۲- ساختار ذرات تقویت‌کننده در کامپوزیت ۱ درصد حجمی TiB₂، تقریباً کروی شکل و با اندازه کمتر از ۰/۵ میکرومتر است درحالی‌که این ساختار در کامپوزیت ۵ درصد حجمی TiB₂ به شکل هگزگونال و با اندازه حدود ۲ میکرومتر می‌باشد.
- ۳- با افزایش ذرات TiB₂، اندازه دانه فاز زمینه آلومینیم ۵۰۸۳ کاهش می‌یابد که این کاهش اندازه دانه، منجر به افزایش هم‌زمان استحکام کششی نهایی و انعطاف‌پذیری می‌شود.
- ۴- با افزایش مقدار TiB₂ سختی، استحکام تسلیم، مدول الاستیک و استحکام کششی نهایی کامپوزیت افزایش می‌یابد که به دلیل وجود ذرات TiB₂ و کاهش اندازه دانه است. همچنین با افزایش مقدار TiB₂ به مقدار ۱ درصد حجمی، انعطاف‌پذیری افزایش‌یافته و پس‌از آن با افزایش مقدار TiB₂ به مقدار ۵ درصد حجمی انعطاف‌پذیری کامپوزیت کاهش می‌یابد.

- [17] G. Han, W. Zhang, G. Zhang, Z. Feng, Y. Wang, High-temperature mechanical properties and fracture mechanisms of Al-Si piston alloy reinforced with in situ TiB_2 particles, *Materials Science and Engineering A*, 2015, vol. 633, pp. 161-168.
- [18] H.B. MichaelRajan, S. Ramabalan, I. Dinaharan, S.J. Vijay, Synthesis and characterization of in situ formed titanium diboride particulate reinforced AA7075 aluminum alloy cast composites, *Materials and Design*, 2013, vol. 44, pp. 438-445.
- [19] Z. Chen, T. Wang, Y. Zheng, Y. Zhao, H. Kang, L. Gao, 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 and Engineering A*, 2014, vol. 605, pp. 301-309.
- [20] P. Davies, J.L.F. Kellie, D.P. Parton, London and Scandinavian, Co. Ltd., Patent, 1993, WO 93/05189.
- [21] T. Wang, Z. Chen, Y. Zheng, Y. Zhao, H. Kang, L. Gao, Development of TiB_2 reinforced aluminum foundry alloy based in situ composites - part II: enhancing the practical aluminum foundry alloys, using the improved Al-5 wt.% TiB_2 master composite upon dilution, *Materials Science and Engineering A*, 2014, vol. 605, pp. 22-32.
- [22] F. Chen, Z. Chen, F. Mao, T. Wang, Z. Cao, TiB_2 reinforced aluminum based in situ composites fabricated by stir casting, *Materials Science and Engineering A*, 2015, vol. 625, pp. 357-368.
- [23] S. Kumar, M. Chakraborty, V. SubramanyaSarma, B.S. Murty, Tensile and wear behavior of in situ Al-7Si/ TiB_2 particulate composites, *Wear*, 2008, vol. 265, pp. 134-142.
- [24] C.Y. Dan, Z. Chen, G. Ji, S.H. Zhong, Y. Wu, F. Brisset, H.W. Wang, V. Ji, Microstructure study of cold rolling nanosized in-situ TiB_2 particle reinforced Al composites, *Materials and Design*, 2017, vol. 130, pp. 357-365.
- [25] M. Li, K. Ma, L. Jiang, H. Yang, E.J. Lavernia, L. Zhang, J.M. Schoenung, Synthesis and mechanical behavior of nanostructured Al5083/n- TiB_2 metal matrix composites, *Materials Science and Engineering A*, 2016, vol. 656, pp. 241-248.
- [26] A.S. Vivekananda, S.B. Prabu, Wear behaviour of in situ Al/ TiB_2 composite: influence of the microstructural instability, *Tribology Letters*, 2018, vol. 66, pp. 41.
- [27] G. Moona, R.S. Walia, V. Rastogi, R. Sharma, Aluminium metal matrix composites: A retrospective investigation, *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, 2018, vol. 56, pp. 164-175.
- [28] N.L. Yue, L. Lu, M.O. Lai, Application of Thermodynamic Calculation in the In-Situ Process of Al/ TiB_2 Composite Structures, 1999, vol. 47, pp. 691-694.
- [29] S. Agrawal, A.K. Ghose, I. Chakraborty, Effect of rotary electromagnetic stirring during solidification of In-situ Al- TiB_2 composites, *Materials and Design*, 2017, vol. 113, pp. 195-206.
- [30] B.S. Murty, S.A. Kori, M. Chakraborty, Grain refinement of aluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying, *International Materials Reviews*, 2002, vol. 47, pp. 3-29.